

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Ekologie a ochrana prostředí

Ochrana životního prostředí



Jiří Hromádka

Kvalita ovzduší ve školách

Air quality in schools

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Martin Braniš, CSc.

Praha, květen 2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 13. 5. 2011

Jiří Hromádka

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce prof. RNDr. Martinu Branišovi, CSc. za pomoc, trpělivost a poskytnuté rady při sepisování této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem pracovníkům FZŠ Otokara Chlupa za pomoc a spolupráci při měření.

Obsah

Obsah	3
Abstrakt	5
Abstract	6
1 Úvod	7
1.1 Děti jako specifická skupina	8
1.2 Situace ve světě a v ČR	8
1.3 Struktura práce	9
2 Sledované škodliviny ve školách	10
2.1 Aerosolové částice	10
2.1.1 Koncentrace aerosolových částic ve školách	11
2.1.2 Vliv sezonality a počasí	12
2.1.3 Vliv dopravy a industrializace	13
2.1.4 Poměr koncentrací uvnitř a venku	13
2.1.5 Chemické složení	14
2.1.6 Vliv aktivity žáků v učebnách	16
2.1.7 Vliv pokrytí podlahy	16
2.1.8 Vliv klimatizace	17
2.2 Oxid uhličitý a ventilace budov	17
2.2.1 Oxid uhličitý jako indikátor špatného vzduchu	18
2.2.2 Učebny s přirozenou ventilací	18
2.2.3 Učebny s mechanickou ventilací	19
2.2.4 Srovnání typů mechanické ventilace	20
2.2.5 Specifika ventilace v počítačových učebnách	20
2.2.6 Vliv na absenci a pozornost žáků	21
2.2.7 Možnosti zlepšení ventilace v učebnách	21
3 Pilotní měření	23
3.1 Úvod pilotního měření	23
3.2 Metodika měření	23
3.2.1 Lokalita měření	23
3.2.2 Použité přístroje a způsob měření	24
3.3 Výsledky měření	25

3.3.1	Hodnoty PM_{10}	25
3.3.2	Hodnoty CO_2	32
3.3.3	Naměřené hodnoty teploty a relativní vlhkosti	35
3.4	Diskuse	35
3.5	Závěr pilotního měření	36
4	Závěr	38
5	Seznam použité literatury	39

Abstrakt

V poslední dekádě je publikováno stále více studií týkajících se kvality vnitřního prostředí. Ukazují na zvýšené koncentrace aerosolových částic a problémy spojené se špatnou ventilací, které mohou citlivým jedincům způsobovat zdravotní problémy. Jednou z rizikových skupin jsou rovněž děti, které mimo domov tráví velké množství času ve škole, tudíž kvalita ovzduší ve školách je problémem, který zasluhuje pozornost.

Tato práce se věnuje literární rešerši odborných studií s touto tematikou, snaží se zachytit hlavní faktory ovlivňující kvalitu vnitřního prostředí, přičemž je kladen důraz zejména na koncentraci aerosolových částic a oxidu uhličitého. Z faktorů prostředí byly vybrány následující: stáří školní budovy, její umístění, roční období, počet žáků a jejich aktivita, pokrytí podlahy a míra ventilace.

Ověření těchto předpokladů se věnovalo pilotní měření, ve kterém byla měřena koncentrace PM_{10} a CO_2 , teploty a relativní vlhkosti ve třech třídách v rámci FZŠ Otokara Chlupa v Praze. Byla prokázána zvýšená koncentrace aerosolových částic při zvýšené aktivitě dětí, dále pak, že snížená ventilace vede ke zvýšení koncentrace CO_2 . Také se ukázala malá provázanost koncentrací PM_{10} uvnitř a venku. Pro lepší pochopení celé problematiky je potřeba provést další měření.

Klíčová slova:

Školy, kvalita ovzduší, aerosol, expozice, oxid uhličitý

Abstract

A lot of scientific articles were published about the indoor air quality during the last decade. It is proven that high concentrations of particulate matter and problems connected with poor ventilation conditions can cause health effects to people who are sensitive to them. Children are one of the groups at risk. They spend a lot of time at home and also at school, so the air quality at schools is an important issue.

This work contains a review of scientific papers concerning this issue. It discusses the factors influencing indoor air quality, mainly concentration of particulate matter and carbon dioxide. Other factors were also chosen: the age of the school building and its location, the seasonality, the number and level of activity of pupils, floor carpeting and the amount of air circulation in the classrooms.

The preliminary study tries to prove these theories. The concentration of PM_{10} and CO_2 , the temperature and the relative humidity were measured in three classrooms at one primary school in Prague. The results show that higher concentration of particulate matter is correlated with higher level of activity of pupils. Also poor ventilation leads to the higher concentration of carbon dioxide and poor air quality. It was proven that there is a minimal correlation between indoor and outdoor concentration of PM_{10} . For better understanding of this issue, other studies are needed.

Key words:

Schools, air quality, aerosol, exposure, carbon dioxide

1. Úvod

Znečištění ovzduší a jeho vlivu na zdraví lidské populace je věnována pozornost již dlouho. V minulosti bylo vždy toto znečištění spojeno s přírodní katastrofou, například sopečnou činností, ale od dob průmyslové revoluce se stala lidská činnost hlavním zdrojem znečištění. Při výbuchu sopky Laki v roce 1783, který je považován za jeden z největších v historii lidské kultury, bylo do ovzduší emitováno srovnatelné množství oxidu siřičitého, jaké se uvolnilo v roce 1990 vlivem antropogenní činnosti (Stevenson et al., 2003).

Jedním ze zlomových bodů, pokud jde o pozornost věnovanou řešení tohoto, postupem času vzrůstajícího problému, se stala smogová situace v Londýně v roce 1952, kdy extrémní znečištění ovzduší stálo u zrodu značného nárůstu úmrtnosti a nemocnosti obyvatel. Je odhadováno, že na přímé následky plynoucí ze smogové situace zemřelo více než dvanáct tisíc obyvatel od prosince 1952 do února následujícího roku (Bell a Davis, 2001).

Dnes je již zcela bez pochyb prokázáno, že znečištění ovzduší negativně ovlivňuje lidské zdraví a může být v extrémních případech i příčinou předčasného úmrtí (Pope a Dockery, 2006). Kvalitu ovzduší je tedy třeba průběžně sledovat a snažit se epizodám vysokých koncentrací předcházet nebo zabránit.

Vezmeme-li v úvahu rizikové skupiny obyvatel, pak kromě starých lidí a osob postižených kardiovaskulárními poruchami, jsou rizikovou skupinou také děti, které tráví mimo domov většinu času ve škole. Proto je více než důležité věnovat se sledování kvality ovzduší ve školách.

Znečištění ovzduší sice není hlavní příčinou nemocnosti či snad úmrtnosti dětí ve vyspělých zemích, ale přesto je stále více spojováno se zdravotními riziky. Zvláště pak pro výskyt astmatu hrají klíčovou roli emise z dopravy (Schwartz, 2004), rovněž koncentrace alergenů ve školních budovách je významným faktorem, který si zasluhuje pozornost. Alergeny jsou hlavní rizikovou složkou, která způsobuje astma dětí (Abramson et al., 2008).

Na současném životním stylu se projevuje stále se zvyšující se míra urbanizace a také vzrůstající čas strávený uvnitř budov, kde jsou logicky zcela odlišné podmínky vzhledem k životnímu prostředí (Ekmekcioglu a Keskin, 2007). Znečištění vnitřního prostředí je významným faktorem, který není možné již nadále přehlížet.

Ačkoliv se ukazuje, že lidé žijící ve městech tráví uvnitř budov až 90% svého času, je většina vědeckých studií týkajících se kvality ovzduší věnována kvalitě vnějšího prostředí (Leech et al., 2002). Pokud se týkají vnitřního prostředí, tak velmi málo z nich se zabývá problematikou základních škol.

Jak již bylo řečeno, problematice venkovního ovzduší je věnována velká pozornost. V České republice je v činnosti dlouhodobě monitoring s velkou sítí měřících stanic, v posledních letech došlo k významnému zlepšení, koncentrace oxidu siřičitého v prostředí poklesla mezi roky 1993-2001 o 80% (Hůnová et al., 2004).

Naproti tomu, je vnitřní prostředí a jeho problematika spíše na pokraji zájmu, jak u odborné, tak laické veřejnosti.

1.1 Děti jako specifická skupina

S výjimkou domova je škola nejdůležitějším vnitřním prostředím z hlediska stráveného času. Děti tráví ve škole až 8 hodin denně, a tak by měla být velká pozornost věnována právě prostředí a možnému znečištění ve školních budovách.

Dětské zdraví je více náchylné na ohrožení plynoucí ze znečištění ovzduší protože plice dětí (a celý organismus) se stále vyvíjejí, a mnohem více citlivě reagují na nebezpečné škodliviny, protože vdechují relativně větší množství vzduchu, vztaženo k velikosti těla, než dospělí (Schwartz 2004) (Avigo et al., 2008).

1.2 Situace ve světě a v ČR

Napříč Evropou je sledována kvalita vnitřního prostředí ve školách. Velká pozornost je věnována koncentraci prachových částic. Popsána je situace v řeckých Aténách (Diapouli et al., 2007, Diapouli et al., 2008), tureckém Istanbulu (Ekmekcioglu a Keskin 2007) i v Německu (Fromme et al., 2008). Situací se zabývají vědci také v USA (Ward et al., 2006), (John et al., 2007) i Asii (Wei et al., 1999).

Dalším významným faktorem je bezesporu také nedostatečná ventilace a s ní spojená koncentrace oxidu uhličitého (Corsi et al., 2002). Dále je věnována pozornost problematice jak přirozeného (Grimsrud et al., 2006), tak mechanického větrání (Kinshella et al., 2001, Barlet et al., 2004). V závěru této části je uvedeno i možné řešení problému s nedostatečnou ventilací (Geelen et al., 2008).

V České republice je tomuto tématu věnována minimální pozornost. Jako součást systému monitorování zdravotního stavu obyvatelstva proběhlo měření ve vybraných

školách, prováděné Státním zdravotním ústavem (SZÚ), které se zaměřilo na koncentrace oxidu uhličitého a koncentrace polétavého prachu, bylo provedeno srovnání ukazatelů kvality ovzduší v různých školách po celé České republice (Mikešová a Kotlík, 2008).

Také měření v tělocvičně v centru Prahy ukázalo zvýšené koncentrace prachových částic v měřené škole, ovšem pro vytvoření širších závěrů je nutné provádět další měření ve více školách (Braniš et al., 2009).

Následná práce, která již porovnávala tělocvičny v různých lokalitách, potvrdila zvýšenou koncentraci prachu při vyšší pohybové aktivitě a zejména při vyšším počtu žáků, přičemž koncentrace $PM_{10-2,5}$ několikanásobně přesahovala koncentraci venku, tudíž vnější vliv na vnitřní koncentraci této velikostní frakce je minimální (Braniš a Šafránek, 2011).

Jak zahraniční, tak české studie ukazují, že problematika kvality ovzduší ve školách je více než zajímavá a že je stále hodně proměnných, které zbývá vyřešit, protože na každé škole panují určité specifické podmínky. Na druhou stranu i tak lze nacházet obecné trendy, které ovlivňují kvalitu vnitřního prostředí.

1.3 Struktura práce

Tato práce se věnuje literární rešerši věnované kvalitě ovzduší ve školách. Snaží se zachytit hlavní směry v tomto oboru, porovnávat je a najít klíčové faktory, které ovlivňují prostředí ve školách. Navazuje pilotní měření, které se zabývá koncentrací prachových částic, oxidu uhličitého a vlhkosti vzduchu. V závěru jsou porovnány naměřené hodnoty s hypotézami a výsledky jiných měření.

2 Sledované škodliviny ve školách

Kvalitu ovzduší lze posuzovat z různých hledisek. Již bylo vysvětleno, proč je důležité zabývat se kvalitou prostředí ve školách. Ovšem na tento problém lze nahlížet z různých úhlů pohledu, přičemž alespoň některým bude dále věnována pozornost, zejména pak koncentraci aerosolových částic a problematice větrání spojené s koncentrací oxidu uhličitého.

2.1 Aerosolové částice

Koncentrace aerosolových částic (dále PM-particulate matter) je jedním z nejdůležitějších ukazatelů kvality vnitřního prostředí. Již dlouho je prokázáno, že vdechování částic menších než deset mikrometrů způsobuje významné zdravotní dopady, přičemž platí, že čím menší je velikost částice, tím se dostává hlouběji do dýchacích cest, kde může způsobit větší zdravotní problémy.

Nepříznivým zdravotním dopadům způsobeným polétavým prachem na organismus byla věnována značná pozornost v posledních 15 letech. Byla prokázána spojitost mezi zvýšenou úmrtností a nemocností a zvýšenou koncentrací PM v ovzduší. Aerosolové částice jsou velmi různorodé, můžeme je dělit podle velikosti, přičemž částice od 2,5 do 10 mikrometrů nazýváme hrubým aerosolem, částice od 1 do 2,5 mikrometrů jemným aerosolem a menší než 1 mikrometr pak ultrajemnou frakcí aerosolu. Na povrch aerosolu pak mohou vázat další chemické látky, zejména kovy, které se tak snadno mohou dostat do plic. Tvar a velikost těchto částic spolu s dalšími fyzikálními vlastnostmi jsou rozhodujícím faktorem pro způsobení zdravotních obtíží (Pope a Dockery, 2006).

Zároveň také záleží na chemickém složení částic, ty mohou mít různou toxicitu. Aerosolové částice generované uvnitř mají menší škodlivost než ty, které vznikly ve venkovním prostředí (Fromme et al., 2008).

Vezmeme-li v úvahu velikost částic a jejich ukládání v dýchacích cestách, pak výsledky ukázaly, že průměrně 42% hrubého aerosolu se ukládá v horních cestách dýchacích a 24% se ukládá v plicích, v případě jemného aerosolu se jedná o 18 procent v horních cestách dýchacích, stejně tak v plicích (Avigo et al., 2008).

Pokud jde o velikost částic, pak jednoznačně platí, že čím větší částice, tím větší je podíl na její koncentraci v rámci specifika dané učebny (aktivita a počet žáků, velikost místnosti, úklid) (Fromme et al., 2007).

Koncentrace aerosolových částic uvnitř je ovlivněna jednak infiltrací z okolí, jednak mohou být zdroje znečištění přímo uvnitř, většinou jsou úzce spojené s lidskou činností. Již pouhá přítomnost lidí může zvyšovat koncentraci prachových částic (Diapouli et al., 2008).

Pro určení kvality vnitřního prostředí je také důležité sledovat koncentrace PM venku. Pro porovnání koncentrací uvnitř a venku byl vytvořen index uvnitř/venku (indoor/outdoor ratio).

Z hlediska vnitřního prostředí také rozlišujeme původ částic, zda se dovnitř dostaly z vnějšího prostředí nebo zda je přítomen vnitřní zdroj. Zde platí, že čím větší částice, tím více jsou emitovány uvnitř, což lze snadno vysvětlit vznikem těchto částic, zatímco PM_{10} vzniká hlavně mechanickými procesy, pak $PM_{2,5}$ vzniká spalováním, tudíž jejím zdrojem je ve městech doprava, mimo města to mohou být spalovací procesy.

Tento zdroj znečištění se může lokálně lišit, zatímco v čínském Lanzhou (severozápadní Čína) je hlavním zdrojem znečištění spalování uhlí (Wei et al., 1999), v americkém městečku Libby v Montaně je to pak spalování dřeva (Ward et al., 2006), v tureckém Istanbulu byly naměřeny vysoké koncentrace prachových částic v souvislosti s dopravou (Ekmekcioglu a Keskin, 2007), stejně tak v řeckých Aténách se při měření prokázal vliv dopravy na koncentraci prachu uvnitř učeben (Diapouli et al., 2008), doprava, resp. množství PM z dopravy které se dostává do vnitřního prostředí, se zdá být problémem ve všech velkých městech, resp. v budovách v blízkosti dopravních tepen.

2.1.1 Koncentrace aerosolových částic ve školách

Ačkoliv ve školách nejsou přítomny typické zdroje, které vedou ke znečištění vnitřního prostředí, jako je kouření, vaření a smažení (i topení na pevná paliva), dochází zde ke zvýšeným koncentracím prachových částic, což lze vysvětlit následovně. Za prvé nedostatečným větráním, což se projevuje zvláště v zimních měsících, dále pak možným nedostatečným úklidem a v neposlední řadě se uvnitř učeben nachází poměrně velké množství dětí, které zde tráví denně několik hodin, přičemž jakákoliv jejich aktivita vede k resuspenzi prachu z podlahy (Fromme et al., 2008).

Stejně jako jsou rozdílná místa, ve kterých jsou prováděna jednotlivá měření a vědecké studie, stejně tak se liší i naměřené hodnoty prachových částic v učebnách. Spíše než absolutní čísla je ale důležité nacházet souvislosti mezi jednotlivými jevy, vnějšími i vnitřními podmínkami a jejich vlivem na měřenou koncentraci.

2.1.2 Vliv sezonality a počasí

V průběhu roku se střídají různé klimatické podmínky a spolu s nimi se mění i režim v učebnách a tím pádem i sledované koncentrace prachových částic, stejně tak jako oxidu uhličitého a dalších faktorů, jak bude zmíněno dále.

V americkém Ohio proběhlo měření na třech základních školách zaměřené na koncentraci $PM_{2,5}$. Mezi jednotlivými lokalitami nebyly pozorovány žádné výrazné rozdíly koncentrací, přičemž nejvyšších hodnot dosahovaly v létě, od začátku podzimu byl sledován jejich pokles (John et al., 2007).

Naproti tomu v Německu byla situace opačná. V Mnichově bylo prováděno měření ve velkém počtu škol (64), a také byly měřeny i další parametry mimo koncentraci PM. Byly zjištěny velké rozdíly mezi létem a zimou, přičemž, kvalita ovzduší byla rapidně horší v zimě než v létě. Ale i v rámci zimy (léta) se od sebe naměřené hodnoty velmi lišily, což svědčí o širokém spektru vlivů. Kromě již zmíněné sezonality, pak horší podmínky byly zjištěny v malých učebnách, při velkém počtu žáků, při nízkém věku žáků a také při vysokých hodnotách oxidu uhličitého (Fromme et al., 2008)

Rozdíl v těchto měřeních lze vysvětlit zvýšeným větráním v létě, tudíž dochází k cirkulaci vzduchu mezi vnitřním a venkovním prostředím. Koncentrace $PM_{2,5}$, který vzniká mimo budovy, se zvýšeným větráním rovněž zvyšuje. Naproti tomu, při měření PM_{10} , vznikajícím uvnitř budov, se koncentrace zvyšuje při nízké četnosti větrání, protože pak učebna funguje jako takřka uzavřený systém, kde ještě může docházet i k resuspenzi prachu.

V čínských městech byla zjištěna také větší koncentrace prachových částic v zimě než v létě, což je zde přičítáno vlivu lokálních topenišť a následných emisí (Wei et al., 1999). Celkově je pak koncentrace $PM_{2,5}$ závislá na aktuálních meteorologických podmínkách, přičemž nejvyšších hodnot dosahuje při teplotní inverzi (Zollner et al., 2007).

V Montaně bylo prováděné měření v městečku Libby, které se nachází v údolí, ve kterém jsou časté teplotní inverze, tudíž dochází k minimální cirkulaci vzduchu a tím pádem je zde zhoršená kvalita ovzduší. Zimní koncentrace $PM_{2,5}$ jsou tak vysoké, že Libby

překračuje roční limit $PM_{2,5}$ National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) (Ward et al., 2006).

Podobné klima se nachází i v čínském městě Chongqing, také zde jsou pozorovány četné teplotní inverze a minimální pohyby vzduchu, které jsou zde navíc kombinované s častými srážkami. Díky zvýšené četnosti bezvětrných dní a inverzí pak lze pozorovat slabou disperzi polutantů (Wei et al., 1999).

2.1.3 Vliv dopravy a industrializace

Jelikož je provázané prostředí uvnitř budov s okolním, pak je zcela nepochybné, že případné vnější zdroje znečištění ovzduší se v určité míře přenášejí i dovnitř budov. Těmito zdroji může být zejména průmysl nebo doprava.

V Číně proběhlo rozsáhlé měření koncentrace prachových částic ve školních dvorech. Byly měřeny koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ ve 4 městech, vždy v jedné škole v industriální a v jedné škole v subindustriální zóně. Každé město bylo vybráno tak, aby se co nejvíce lišily lokální meteorologické podmínky. Ve všech případech byla naměřena vyšší koncentrace prachových částic v průmyslových zónách dané oblasti, oproti zónám subindustriálním (Wei et al., 1999).

Dalším zdrojem znečištění je kromě průmyslu také doprava. V Aténách byly nejvyšší naměřené koncentrace v místech s nejrušnější dopravou (Diapouli et al., 2008).

V Turecku byla měřena koncentrace prachových částic na pěti školách v Istanbulu, přičemž ve čtyřech z nich došlo k překročení limitů. Zde hrála významnou roli dopravní tepna nacházející se v blízkosti měřených škol, v páté škole nedošlo k překročení limitů, nacházela se v klidné lokalitě, nicméně lepší podmínky v této škole byly způsobeny také intenzivnějším úklidem, celkově se na lepším ovzduší mohla projevit i lepší ekonomická situace této školy, protože byla jako jediná z měřených škol soukromá (Ekmekcioglu a Keskin 2007).

2.1.4 Poměr koncentrací uvnitř a venku

Jak již bylo uvedeno, velikost prachových částic je spojena i s jejich rozdílným vznikem, uvnitř budov tedy vznikají spíše částice hrubého aerosolu, zatímco venku to jsou menší částice aerosolu jemného. Pokud spolu souvisí průběh koncentrací uvnitř a venku, pak poměr těchto hodnot nazývaný indoor/outdoor ratio (I/O ratio) ukazuje jednak na

provázanost obou prostředí, dále pak na možné zdroje, zda jsou venkovní či vnitřní. Obvykle platí, že čím nižší je hodnota tohoto indexu, tím významnější jsou venkovní zdroje. Tento index můžeme uplatnit na jednotlivé velikostní frakce prachových částic, nebo pouze na jednotlivé ionty v těchto frakcích zastoupené.

Při měření v Aténách byl index I/O mírně nad jedna a kolem 1 pro PM_{10} a $PM_{2,5}$ a menší než jedna pro ultrajemné částice, pokud vezmeme v úvahu průměrné hodnoty. Nejnižší I/O index byl zjištěn pro ultrajemný aerosol, kde se pohyboval v rozpětí 0,33 až 0,74, zde jsou hodnoty takto nízké z důvodu absence vnitřního zdroje ultrajemné frakce (Diapouli et al., 2008).

Z hlediska jednotlivých tříd index I/O u PM_{10} v knihovně byl pouze 0,54, zatímco v tělocvičně dosáhl až na hodnotu 2,46. Podobná situace byla naměřena i u $PM_{2,5}$, s tím rozdílem, že nejvyšší I/O index byl zjištěn ve sborovně, zde se jednoznačně projeví účinky kouření, a také klidná venkovní lokalita v daném místě. Také jsou zde jasně vidět rozdíly mezi jednotlivými učebnami, spojené s využitím učeben a aktivitou žáků v různých učebnách (Diapouli et al., 2008).

Při srovnání koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ uvnitř a venku bylo zjištěna vyšší koncentrace uvnitř, zvláště pak u PM_{10} , přičemž zde byla uvnitř naměřena až desetinásobná koncentrace než venku. V této studii ale byla za venkovní koncentrace považována data z měřících stanic, které se nenacházely v úplně těsné blízkosti škol, nicméně i tak, lze odvodit vyšší koncentraci uvnitř než venku, přičemž zdrojem prachových částic uvnitř je jednoznačně lidská činnost (Ekmekcioglu a Keskin, 2007).

V americkém městě Mira Loma bylo provedeno měření kvality vnitřního prostředí v domácnostech a ve školních učebnách. Byly zjišťovány koncentrace $PM_{2,5}$, přičemž index indoor/outdoor byl mnohem menší v případě školních učeben (0,38) proti domácnostem (0,87) (Sawant et al., 2004). Zde se nabízí poměrně jednoduché vysvětlení v podobě absence kouření a vaření v učebnách, což vede k lepším hodnotám indexu.

2.1.5 Chemické složení

Již zde byla věnována pozornost rozdělení prachových částic z hlediska velikostních frakcí i hlediska jejich zdroje, ale neméně důležitým faktorem je i jejich chemické složení, které ovšem s předchozími kritérii úzce souvisí.

I když je prokázána vyšší koncentrace prachových částic v učebnách oproti venkovnímu prostředí v okolí školy, nemusí být tato vyšší koncentrace přímo úměrná zvýšenému zdravotnímu riziku (Schwarze et al., 2006). Pro zohlednění zdravotních dopadů

je důležité chemické složení prachu, které se ale zásadně liší při porovnání částic pocházejících z vnitřního a venkovního prostředí, kdy vnitřní prostředí emituje méně škodlivé částice. (Fromme et al., 2008). Z tohoto důvodu je potřeba sledovat nejen celkové množství prachových částic, ale i jejich původ, velikost, tvar a chemické složení.

Chemické složení aerosolu se liší podle hmotnostních frakcí. Prvky, které jsou spojovány s antropogenním znečištěním ovzduší, nalézáme častěji ve frakci $PM_{2,5}$, což také souvisí s jejich vznikem chemickými procesy, spalováním. Zvláště pak když dochází ke spalování uhlí s příměsí síry jako topení v domácnostech. Tento proces je hlavním zdrojem znečištění v měřených městech v Číně. Také bylo pozorováno, že koncentrace těchto prvků je vždy vyšší v městských než příměstských oblastech pokud se jedná o PM_{10} , a s drobnými výjimkami i pokud se jedná o $PM_{2,5}$ (Wei et al., 1999).

Jedním z hlavních sledovaných prvků je síra, resp. síranové anionty. Z hlediska jednotlivých prvků je koncentrace síry přibližně srovnatelná v obou prostředích, což je způsobeno absencí jejich zdrojů uvnitř. Síra pochází vždy z venkovního zdroje (Fromme et al., 2008). V ovzduší je výskyt síry vázán na spalování fosilních paliv, případně na následnou depozici ve formě kyselých dešťů.

Zajímavá je koncentrace síranového aniontu, který se při měření v Aténách vyskytoval ve zhruba dvojnásobných koncentracích venku než uvnitř. Obecně lze odvodit, že při absenci vnitřního zdroje je iont SO_4^{2-} dobrým ukazatelem propustnosti látek z vnějšího do vnitřního prostředí (Diapouli et al., 2008).

Oxidy dusíku jsou mnohem více zastoupeny ve vnějším prostředí než uvnitř, jejich zdrojem jsou především emise z dopravy. Opět zde není přítomen vnitřní zdroj.

Obecně platí, že kovy, pokud jsou přítomny ve vnitřním prostředí, se do něj dostávají zvnějšku, zatímco uvnitř jsou prachové částice tvořeny z křemíku, kyslíku, vápníku a uhlíku. Složení zejména větších částic (PM_{10}) je odlišné uvnitř a venku, uvnitř je tvořen zejména minerály a také kožními šupinkami (Fromme et al., 2008). Při měřeních byla také nalezena přítomnost chloru (Diapouli et al., 2008, Ekmekcioglu a Keskin, 2007).

V Brazílském městě Curitiba byly analyzovány následující skupiny látek v zachyceném prachu v učebnách: Hlinitokřemičitany, saze, organické látky, vápenec a na olovo bohaté částice. Zcela evidentním vnitřním zdrojem vápníku je používání křídly a tradiční tabule, nicméně i přesto zde byla koncentrace uvnitř zhruba dvakrát menší než venku, venkovním zdrojem je rozrušování nejrůznějších materiálů a jejich následné úlomky, které přecházejí do prostředí, spolu s vápníkem tak přechází také hliník, křemík, draslík a železo (Avigo et al., 2008).

Podobné výsledky přinesla analýza chemického složení prachu v tureckém Istanbulu. Ukázala, že zde převažují hlinité a křemičité ionty, ale byl také pozorován vyšší výskyt vápenatých iontů, které mají svůj původ v používání křídý (Ekmekcioglu a Keskin, 2007).

2.1.6 Vliv aktivity žáků v učebnách

Pokud je budova obývána, vnitřní koncentrace hrubé frakce prachových částic je vyšší než koncentrace pozadových hodnot z okolí (Parker et al., 2008). Znamená to tedy, že čím více je ve třídě žáků, tím více lze očekávat nárůst koncentrace prachových částic. Dalšími ukazateli jsou pak počet žáků ve třídě a intenzita úklidu a větrání.

Vliv také může mít i věk žáků. Pokud jde o rozdíly mezi jednotlivými třídami, ukázalo se, že čím nižší je věk, tím jsou vyšší naměřené koncentrace PM, což lze vysvětlit zvýšenou fyzickou aktivitou mladších dětí.

V Montaně proběhlo měření prachových částic, které srovnávalo jejich koncentraci uvnitř základní a střední školní školy. Ve všech měřených hmotnostních frakcích byly zjištěny vyšší hodnoty uvnitř základních škol, přičemž tento poměr byl zhruba 2-5 násobný a až desetinásobný u měřené frakce PM_{1-2,5}. Tento rozdíl může být vysvětlen následovně. Za prvé, budova základní školy byla postavena v roce 1953, je tedy starší než budova střední školy postavená v roce 1970 a za druhé, na základní škole bylo měření prováděno v tělocvičně, která se již opticky jeví jako prашnější místo, zatímco na střední škole proběhlo měření uvnitř budovy, v oblasti s malou aktivitou žáků a také se nikde v okolí nenacházely dveře ani okna (Ward et al., 2006).

2.1.7 Vliv pokrytí podlahy

Pokrytí podlahy kobercem se jeví jako důležitý faktor při zkoumání stavu vnitřního prostředí. Spolu s dalšími vlivy, jako je četnost úklidu, údržby ve třídách a ventilace, může významnou měrou přispívat ke zvýšení koncentrace prachových částic. Souhrnná analýza naměřených dat ukazuje, že pokrytí učeben koberci představuje zvýšené riziko expozice prachových částic pro děti, oproti učebnám s tvrdým povrchem. Do jaké míry se tato expozice zvýší, závisí na čištění koberců a také na aktivitě žáků ve třídách, jak moc dochází k resuspenzi již usedlých částic. Na druhou stranu, pokrytí představuje filtr, který zachycuje nečistoty, polutanty a alergenů, které by jinak byly volně unášeny vzduchem (Shaughnessy et al., 2002).

Jak již bylo řečeno, problematika koberců není zcela jednoznačná. V jedné studii byly zjištěny významné rozdíly v indexu uvnitř/venku mezi učebnami pokrytými kobercem a linoleem. Průměrné I/O pro učebny s kobercem činilo 2,63, proti 1,03 učebnám s linoleem (Stranger et al., 2007).

Na druhé straně německá studie při srovnávání různých prostředí tvrdí, že z hlediska koncentrace prachových částic nebyl nalezen rozdíl mezi učebnami, kde s dřevěnou podlahou, linoleem nebo učebnami s kobercem, zároveň je však poukázáno na malý počet učeben s kobercem (Fromme et al., 2006), a tak situace kolem pokryvu místností koberci je silně kontroverzní.

Celá problematika by šla shrnout následovně. Tak dlouho, jak dlouho bude možné udržet podlahu čistou za použití vysoce výkonných vysavačů s mikrofiltry, tak dlouho budou koberce nezávadnou, bezpečnou a také ekonomickou cestou pro pokrytí podlah ve školách (Hedge, 2001).

2.1.8 Vliv klimatizace

Školní budovy nejsou v drtivé většině případů vybaveny klimatizací, tudíž pokud v nich probíhají studie zkoumající kvalitu jejich prostředí, pak dochází k měření v budovách s přirozeným větráním. Přesto však, zvláště v USA přibývá školních budov s klimatizací, zvláště v nových budovách se jedná o jedinou možnost větrání, okna již ani nelze otevírat ručně. V americkém Utahu proto proběhlo měření právě ve školách s mechanickým větráním. Studie potvrdila, že pobyt uvnitř budov s mechanickým větráním snižuje množství expozice submikronických částic (Parker et al., 2008).

Klimatizace a větrání obecně, je jevem spíše spojeným s ventilací vzduchu a koncentrací oxidu uhličitého.

2.2 Oxid uhličitý a ventilace budov

Prachové částice nejsou jediným problémem, pokud se zajímáme o kvalitu vnitřního prostředí. Již byla zmíněna provázanost mezi vnitřním a vnějším ovzduším, a také byla řeč o zdrojích typických pro vnější a vnitřní prostředí. Nicméně pokud jde o prachové částice a ventilaci, obojí je značně provázané. Ukazuje se spojitost mezi koncentrací CO₂ a koncentrací prachových částic uvnitř (Shaugnessy et al., 2002).

Zatímco zvenku přichází dovnitř hlavně emise z dopravy a průmyslu, látky vzniklé spalováním, uvnitř budov se vlivem lidské přítomnosti uvolňují hlavně větší částice,

vzniklé převážně mechanicky, nebo to jsou produkty metabolismu, pak se může jednat o různé těkavé organické látky (Volatile organic compounds – VOC), kožní šupinky, kapičky vody či potu, a s tím způsobený pach, či na činnost člověka se vážající mikroorganismy. (Barlett et al., 2004).

Nicméně i uvnitř budov dochází k tvorbě jednoho plynu, který je charakteristický pro metabolismus, tím plynem je vydechovaný oxid uhličitý. V obývaných učebnách, koncentrace CO₂ může být použita jako indikátor míry ventilace a odstraňování škodlivin ze vzduchu (Geelen et al., 2008).

Špatné větrání vede k akumulaci látek vznikajících lidskou činností i případných dalších polutantů, které se mohou ve školním prostředí objevit, zejména pak při zvýšené fyzické aktivitě dětí nebo při nedostatečném úklidu (Corsi et al., 2002).

2.2.1 Oxid uhličitý jako indikátor špatného vzduchu

Již v roce 1858 se objevilo tvrzení, že koncentrace oxidu uhličitého jako takového není důležitá, ale že je to indikátor pro další látky produkované člověkem. Zároveň Von Pettenhofer ve stejném roce určil hranici 1000 ppm, jakožto míru kvality vzduchu vhodného k dýchání uvnitř (Pettenkofer, 1858 ex Geelen et al., 2008).

Koncentrace oxidu uhličitého byla předmětem dalšího zkoumání. Již průzkum z roku 1880 ukázal, že v učebnách ve švédských školách často překračovala hranici 1000 ppm (Heyman, 1880 ex Walinder et al., 1998). Problematika koncentrace oxidu uhličitého je úzce spjata s ventilací, resp. větráním v učebnách. Pro vnitřní prostředí je doporučena norma 1000 ppm (ASHRAE-American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers), avšak u nás je oficiální hranice stanovena na 1500 ppm. Jak ukazují prováděné studie, je tento limit hodně často překračován.

2.2.2 Učebny s přirozenou ventilací

Ve většině škol chybí mechanická ventilace vzduchu, a tak probíhá ventilace přirozená, tudíž k výměně vzduchu dochází prostým větráním.

Problém s ventilací může být zvláště v zimě spojený i s ekonomickou situací ve školách, protože častější větrání je logicky spojené s vyššími náklady na topení, což bylo prokázáno v jedné studii z americké Minnesoty. Při poměru ceny energie za topení na

jednoho studenta se ukázalo, že všechny školy, které měly výborné ventilační podmínky, patřily rovněž mezi školy s největšími náklady za topení (Grimsurd et al., 2006).

V učebnách bez mechanické ventilace je kvalita ovzduší silně závislá na vnímání jednotlivců v učebnách, ale to může být dost zkreslené. Zvláště pak u koncentrace oxidu uhličitého, která narůstá postupně, tudíž organismus jedinců uvnitř místnosti si postupně zvyká na zvýšenou koncentraci CO_2 . Ve výsledku pak tato koncentrace narůstá, aniž by byla rozpoznána jedinci uvnitř.

2.2.3 Učebny s mechanickou ventilací

Z předcházejících tvrzení jasně vyplývá, že chceme-li se zabývat problematikou vnitřního prostředí, je nutné brát v úvahu ventilaci budov, která se může dělit na mechanickou a přirozenou. Jako indikátor špatného vzduchu se používá oxid uhličitý, jehož koncentrace v ovzduší je známá a uvnitř budov se mění v závislosti na jejich obydlenosti a právě v závislosti na intenzitě větrání.

Efektivitu ventilace, resp. množství vzduchu, který je potřeba vyměnit uvnitř učeben lze exaktně spočítat, pokud známe počet dětí, jejich věk a alespoň přibližně i jejich aktivitu. Tímto získáme jak množství oxidu uhličitého vytvořeného uvnitř, tak i množství vzduchu z vnějšího ovzduší, který by se měl dostat pomocí větrání dovnitř, za předpokladu známého rozdílu koncentrací CO_2 v obou prostředích. Míru ventilace tak odvozujeme podle koncentrace oxidu uhličitého. Druhou možností je pak měření podle netečného plynu, jakým může být například fluorid sírový (SF_6) (Barlett et al., 2004).

Systémy mechanické ventilace spočívají na principu předpokládaného počtu lidí, resp. velikosti daného prostoru, a tudíž vypočteného objemu vzduchu, který je třeba uvnitř vyměnit.

Tento systém funguje relativně dobře v kancelářích, kde je relativně nízká aktivita a pohyb jednotlivých pracovníků, a hlavně zde nedochází k žádným velkým výkyvům jak v činnosti, tak počtu jedinců.

Je třeba si uvědomit, že jsou pro kvalitu ovzduší ve třídách využívány průměrné hodnoty měření. Pokud je přítomno zařízení na mechanickou ventilaci vzduchu, pak je množství vyměněného vzduchu nastaveno na určitý objem za sekundu, který je v čase neměnný.

Naproti tomu ve školních třídách nemůžeme mluvit o konstantních podmínkách, tudíž se hodnoty koncentrace oxidu uhličitého v průběhu dne rapidně mění, a tak nárazově

mohou překročit limity více než je patrné z průměrných hodnot, v případě přirozené ventilace, pak může dojít k nedostatečnému větrání, zvláště pak, je-li pouze nárazové. Celkově výsledky odečtené z průměrných hodnot mohou být těmito skutečnostmi lehce zkreslené.

2.2.4 Srovnání typů mechanické ventilace

V rámci určení kvality vnitřního prostředí v klimatizovaných učebnách byly srovnávány různé ventilační systémy. Prvním z nich byl jednotkový ventilační systém (unit ventilation UV), druhým pak systém proměnného objemu vzduchu (variable air volume systém VAV), a stálý objemový systém (constant volume systém CV). Ve všech učebnách byly měřeny koncentrace prachových částic, oxidu uhličitého a zároveň bylo zohledněno i subjektivní vnímání kvality prostředí, při tom se ukázalo, že když je zvýšená koncentrace oxidu uhličitého pouze po krátký časový úsek, pak toto zhoršení subjektivně lidé uvnitř nezaznamenávají. Výsledky ukázaly na častější výskyt problémů s nosní dutinou, bolestmi hlavy a krku ve školách vybavených UV ventilací, ale zároveň byla v těchto školách naměřena nejnižší koncentrace CO₂, nejvyšší průměr pak byl naměřen v budovách vybavených CV ventilací. Zároveň ale všechny průměrné hodnoty byly nižší než stanovený limit ASHRAE (Kinshella et al., 2001).

2.2.5 Specifika ventilace v počítačových učebnách

Učebnou se zcela odlišnými podmínkami v rámci režimu školy je bezesporu učebna výpočetní techniky. Zaslouží si zvýšenou pozornost, přestože se zde vyskytuje menší počet žáků a také učebna není vytížena po celý den. Na druhou stranu zde na kvalitu prostředí působí nejen žáci, ale i počítače, které vyzařují množství tepla. Je důležité sledovat a kontrolovat teplotu vzduchu stejně tak jako ostatní parametry. Z výše uvedeného vyplývá potřeba zvýšené ventilace v počítačových učebnách.

Ovšem při zvýšených hodnotách ventilace, které by se pak měly pohybovat kolem hodnot 10 l.s⁻¹ na osobu, dochází ke snížení teploty a vlhkosti v učebně, což může dále způsobovat zdravotní obtíže a subjektivně také horší vnímání podmínek prostředí. Na druhou stranu zvýšená ventilace snižuje koncentraci oxidu uhličitého (Norback et al., 2008).

2.2.6 Vliv na absenci a pozornost žáků

O tom, že zhoršená kvalita vnitřního prostředí je zdravotním rizikem, bylo již psáno výše. Pokud jsou tedy v učebnách zvýšená zdravotní rizika, dá se logicky předpokládat i zvýšená absence žáků v tomto prostředí. Stejně tak, jak bylo uvedeno výše, ventilace se přímo úměrně podílí na kvalitě vnitřního prostředí. Vezmeme-li v úvahu všechny tyto skutečnosti, pak zlepšením efektivity ventilace můžeme zlepšit docházku žáků. Zajištění lepších ventilačních podmínek je tedy klíčové pro zlepšení kvality vnitřního prostředí (Shendel et al., 2004).

Jestliže považujeme za správný předpoklad, že zhoršená kvalita vnitřního prostředí v učebnách vede k vyšší absenci žáků ve školách, je třeba se dále zabývat otázkou, jak velký vliv má kvalita ovzduší a přímo četnost ventilace na pozornost žáků přímo v době výuky. Ze stejného předpokladu vycházela jedna americká studie. Pro srovnání pozornosti žáků s mírou ventilace byly zvoleny výsledky testu z matematiky. Ve většině sledovaných tříd nebyl splněn limit ASHRAE, četnost ventilace byla pozorována zhruba poloviční. Lze konstatovat, že zvýšená hladina CO_2 je jedním z faktorů, který negativně ovlivňuje pozornost žáků, avšak pro lepší pochopení problematiky by bylo vhodné provést další průzkum s větším množstvím účastníků (Shaugnesy et al., 2006).

Míra pozornosti žáků a studijních výsledků v závislosti na kvalitě prostředí je však hodně polemickým tématem. Je třeba si uvědomit, že fyzikální faktory prostředí nejsou těmi hlavními ukazateli. Záleží na skupině dětí, jejich zájmu o předmět, schopnosti zaujmout ze strany vyučujícího a na dalších faktorech, které můžeme jen velmi těžko exaktně postihnout.

2.2.7 Možnosti zlepšení ventilace v učebnách

Zhoršená kvalita ovzduší ve školách je spojována se zdravotními dopady, ale vnitřní prostředí lze snadno zlepšit pomocí zvýšené ventilace vzduchu (Geelen et al., 2008). Tento problém i jeho řešení jsou poměrně dobře známé u odborné veřejnosti, avšak i toto jednoduché řešení se nedaří uvádět úspěšně do praxe, změnit návyky chování ve školách tak, aby docházelo k častějšímu větrání. Právě na tuto činnost, resp. její úskalí a výběr nejlepšího postupu se zaměřil jeden holandský projekt.

Jeho cílem bylo zlepšit četnost větrání a jeho účinnost tím, že selepší větrací zvyky na základních školách, přičemž toho mělo být docíleno následovně. Po prvním měření, byly zvoleny následující opatření pro zlepšení kvality vnitřního prostředí. První

skupina škol obdržela pouze doporučení ohledně nutnosti zvýšeného větrání, druhá dostala k dispozici přístroj upozorňující na zvýšenou koncentraci CO₂, ve třetí proběhl vzdělávací projekt ohledně zvýšeného větrání, do kterého byly zapojeni přímo i žáci, poslední skupina byla srovnávací, kde nebylo provedeno žádné opatření. V krátkodobém i dlouhodobém horizontu (6 týdnů po intervenci) se projevily nejlepší výsledky u metody použití přístroje kontrolujícího zvýšenou koncentraci oxidu uhličitého, o něco hůře dopadla skupina, kde proběhl vzdělávací seminář, tato skupina si zachovala zlepšení i v dlouhodobém horizontu, zatímco při udělení pouhé rady a doporučení ohledně větrání se výsledky po 6 týdnech takřka shodovaly s kontrolní skupinou, kde nebyla provedena žádná intervence. Vzdělávací projekt se tedy projevil jako funkční a zároveň levné řešení k zabezpečení lepší kvality vnitřního prostředí (Geelen et al., 2008).

3 Pilotní měření

3.1 Úvod pilotního měření

Jak již bylo uvedeno, přes nutnou pozornost, která by měla být věnována tématu kvality ovzduší ve školách, jsou praktická data z prostředí českých škol velmi omezená. Součástí této práce je tedy i pilotní měření vybraných ukazatelů vnitřního prostředí: Koncentrace prachových částic PM_{10} , koncentrace oxidu uhličitého, teploty a vlhkosti vzduchu.

Při měření byl kladen důraz na zjištění míry provázanosti vnitřního a vnějšího prostředí. Také se zaměří na vliv aktivity žáků během výuky na koncentraci PM_{10} a pozornost byla rovněž věnována korelaci míry ventilace a koncentrace CO_2 . Poslední otázkou je pak míra ovlivnění kvality vnitřního prostředí vybavením učebny, zvláště pak typem tabule a typem pokrytí podlahy.

3.2 Metodika měření

3.2.1 Lokalita měření

V Praze se nachází přibližně 250 základních škol, které se liší stářím budovy, typem okolní zástavby, vzdáleností od dopravních tepen a samozřejmě také i vnitřním chodem školy.

Pro pilotní měření byla vybrána FZŠ prof. Otokara Chlupa. V blízkém okolí školy není žádná dopravní tepna, ani silnice. Budova byla postavena v roce 1990 a je zasazena do klidné lokality Prahy 13, městské části Nové Butovice.

Jedná se o typickou sídlištní školu, která je svojí strukturou i umístěním podobná dalším školám postaveným na sídlištích v okolí centra Prahy. Budova prošla v loňském roce rekonstrukcí, která částečně ještě probíhá (úprava atria), okna jsou plastová, ve škole je jídelna s kuchyní, učí se zde přibližně 600 žáků v 29 třídách. V budově není instalována klimatizace, dochází zde k přirozené ventilaci.

V rámci školy byly vybrány tři učebny, dále pak bylo provedeno srovnávací měření na střeše školy, k získání pozadřových hodnot znečištění.

První učebna se nachází v prvním podlaží budovy, je vybavena interaktivní a plastovou tabulí, tudíž se zde nepoužívají křídly. V zadní části místnosti je koberec. Učebna

je kmenovou pro třídu 2.C, navštěvují ji děti ve věku sedmi až osmi let, žáci v učebnách tráví i přestávky. V odpoledních hodinách, asi do 16 hodin je zde školní družina pro první stupeň. Uvnitř učebny je také klec se dvěma morčaty.

Druhá měřená učebna se nachází rovněž v prvním podlaží budovy, na stejné chodbě jako první, okna jsou situována do stejné ulice. V této učebně není žádný větší koberec, je vybavena klasickou tabulí, na kterou se píše křídou. Je kmenovou učebnou pro třídu 3.B, navštěvují ji děti ve věku 8-9 let, žáci v učebně tráví i přestávky, nenacházejí se zde žádná zvířata.

Třetí měřená učebna se nachází ve druhém podlaží na opačné straně budovy. Nejedná se o kmenovou učebnu žádné třídy, ale o odbornou učebnu výtvarné výchovy, dílnu. Střídají se zde různé třídy druhého stupně, tj. ve věku 11-15 let. Jelikož se jedná o odbornou dílnu, dochází zde k vyšší pohybové aktivitě a vzhledem k pracovním činnostem, které zde probíhají, lze očekávat zvýšenou prašnost.

3.2.2 Použité přístroje a způsob měření

PM₁₀ byla měřena přístrojem DUSTTRAK 8520, který používá laserovou diodu a rozptyl světla pod úhlem 90°. Rozsah tohoto přístroje je 0,001-100 mg.m⁻³ (kalibrace na ISO12103-1 A1 test dust - tzv. Arizona Road Dust), jeho rozlišení +/- 0,1% z naměřené hodnoty nebo +/- 0,001 mg.m⁻³.

Koncentrace CO₂ byla měřena bateriovým přístrojem Telaire 7001, s přesností +/- 50 ppm. Stejným přístrojem byla měřena i teplota s přesností +/- 1°C a také relativní vlhkost.

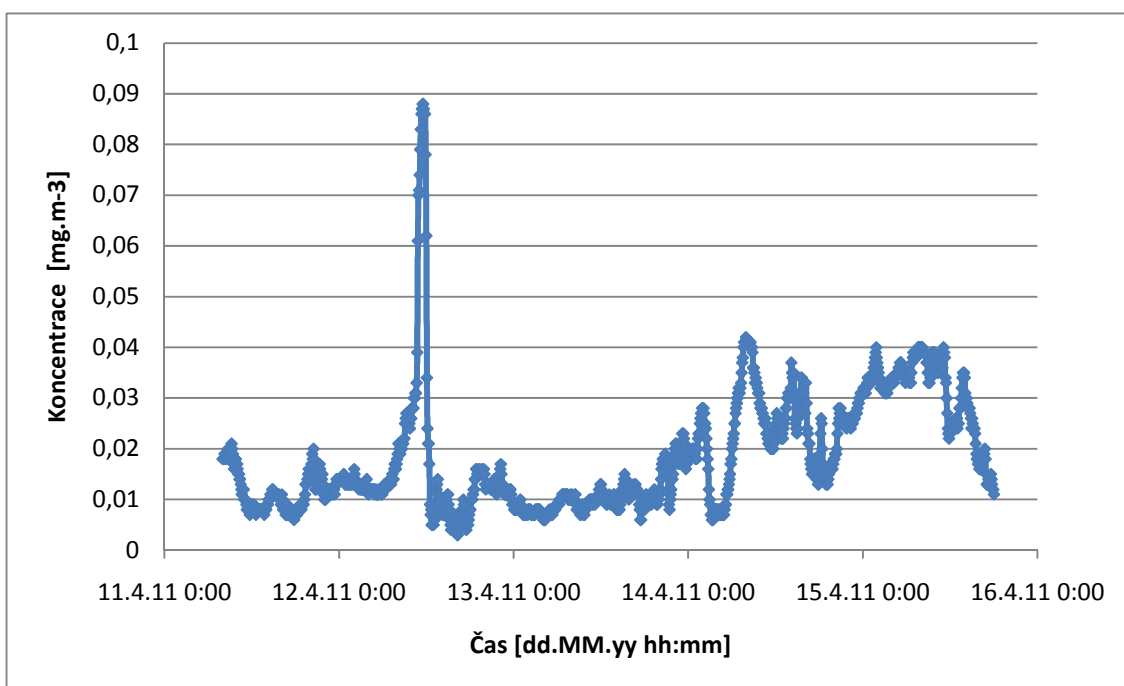
V každé třídě i venku byla měřena koncentrace PM₁₀ v pětiminutových intervalech, dále pak koncentrace oxidu uhličitého a vlhkosti a teploty vzduchu.

Měření probíhalo ve vybraných učebnách po dobu jednoho týdne, začátek měření byl v pondělí v 7 hodin ráno a konec v pátek v 6 hodin večer. Pro získání lepších a hlavně ucelených informací, byly zároveň v době měření vedeny přehledy činnosti, kde vyučující zapisovali počet žáků ve třídě, jejich aktivitu a také intenzitu a četnost větrání.

3.3 Výsledky měření

3.3.1 Hodnoty PM_{10}

Koncentrace PM_{10} ve venkovním ovzduší, měřená na střeše školy, je zobrazena na Obrázku 1. Nebyly pozorovány výrazné výkyvy s výjimkou zhruba hodiny a půl dlouhého úseku ve druhém měřeném dni (12. 4. 2011). Toto dopoledne došlo z neznámého důvodu k náhlému zvýšení koncentrace až na pětinasobek průměrné hodnoty. V závěru týdne došlo k mírnému zvýšení koncentrace. Absolutní čísla je nutné vzhledem k metodě měření brát s jistou rezervou, nicméně průměrná hodnota činila $18 \mu\text{g.m}^{-3}$, medián dosáhl hodnoty $14 \mu\text{g.m}^{-3}$, maximum se vyšplhalo až na $88 \mu\text{g.m}^{-3}$, této hodnoty dosáhla koncentrace PM_{10} v 11:30 dne 12. 4. 2011.



Obrázek 1: Koncentrace PM_{10} – venkovní měření na střeše budovy

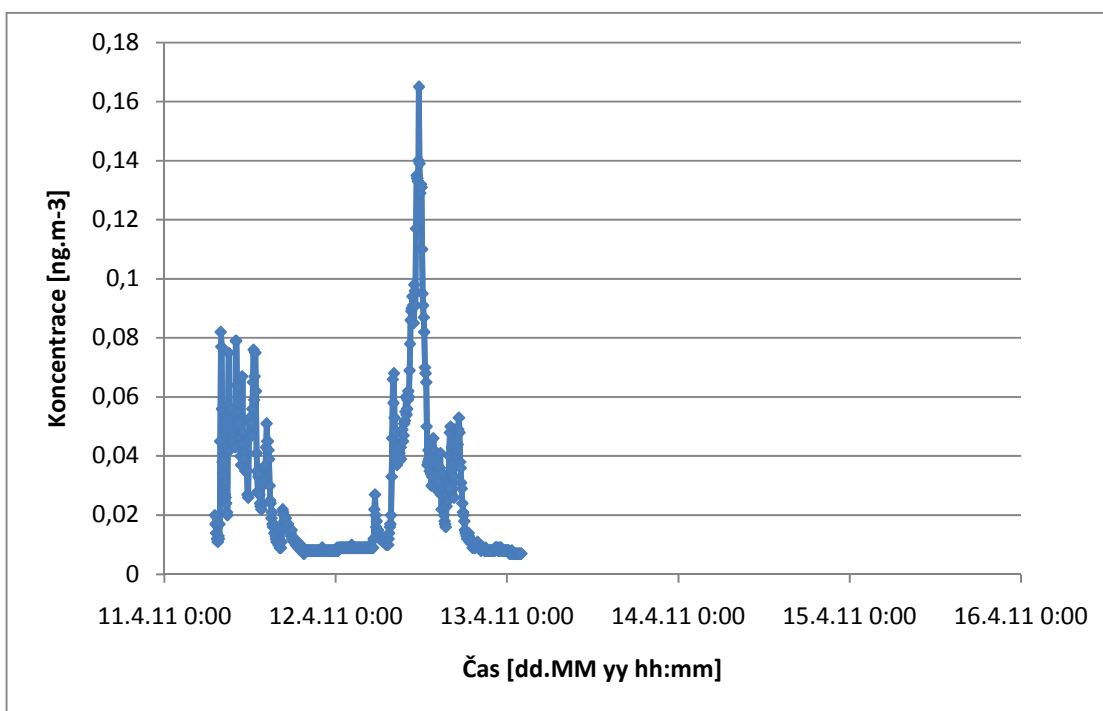
Obrázek 2 zobrazuje hodnoty PM_{10} v první měřené učebně. Zřejmě vinou odpojení přístroje od zdroje energie zde probíhalo měření pouze dva dny, pak došlo k vybití baterií přístroje. Nicméně i tak lze pozorovat některé stejné trendy v porovnání s ostatními učebnami.

Zvýšená koncentrace odráží přesně čas přestávky, situace je dobře čitelná z grafu, kdy lokální zvýšení koncentrace aerosolu přesně odráží časy přestávek, pak je patrný

pokles během hodiny a opětovný nárůst po jejím konci. V noci byly hodnoty v místnosti takřka konstantní, ustálily se na zhruba srovnatelných koncentracích oproti vnějšímu prostředí.

Ve druhý měřený den probíhaly na celém prvním stupni tvořivé dílny. Jednalo se o projektovou výuku, při které byl zvýšený pohyb a aktivita žáků, což se také odrazilo v naměřených koncentracích. Je patrné zvýšení koncentrace při příchodu žáků do třídy, mezi 7:40 a 8:00, pak došlo k poklesu až do 9 hodin. V této době ještě žáci seděli v lavicích, probíhalo vysvětlování následující pracovní činnosti, pak je patrné lineární zvýšení hodnot PM_{10} až do polední pauzy, kde následnému poklesu hodnot před příchodem žáků školní družiny pomohla zřejmě i zvýšená ventilace.

Průměrná hodnota činila $26 \mu\text{g.m}^{-3}$, medián dosáhl hodnoty $13 \mu\text{g.m}^{-3}$, maximum bylo naměřeno ve výši $165 \mu\text{g.m}^{-3}$, této hodnoty dosáhla koncentrace PM_{10} v 11:40 dne 12. 4. 2011.



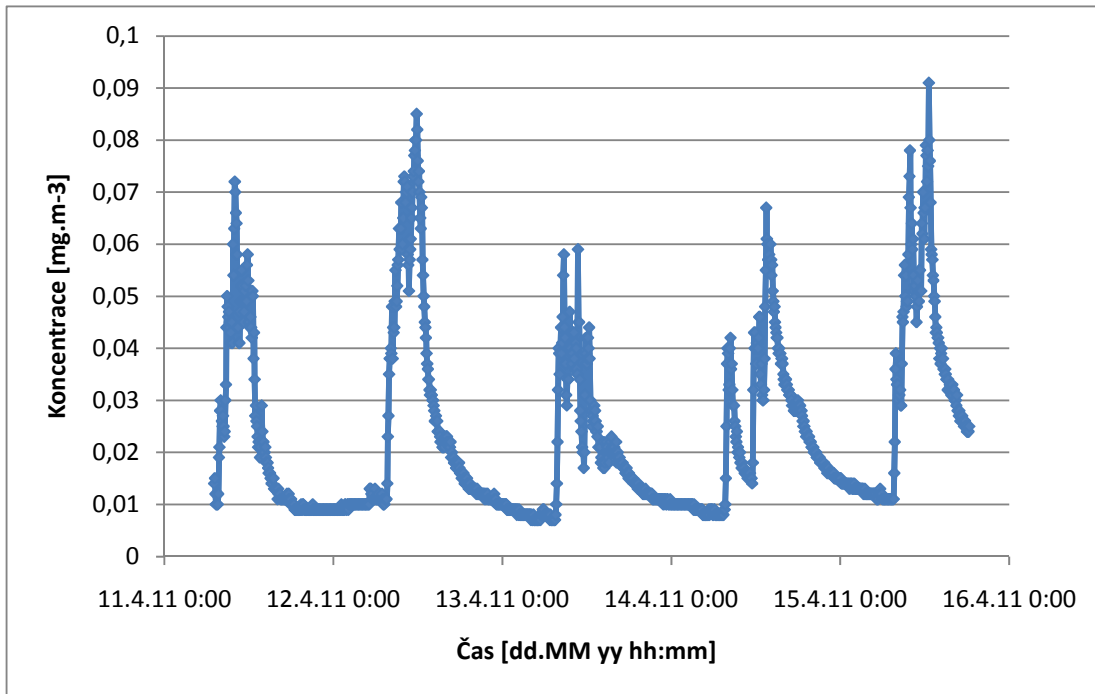
Obrázek 2: Koncentrace PM_{10} – učebna 1

Na třetím obrázku jsou zobrazeny hodnoty PM_{10} ve druhé učebně, stejně jako u té první i zde probíhaly tvořivé dílny ve druhém dni měření. I zde se opět projevil trend maximálních hodnot koncentrací během přestávek. Pokles hodnot ve čtvrtek dopoledne byl způsoben absencí žáků, přičemž koncentrace znatelně poklesla již po půl hodině.

Zajímavé je, že organizovaný pohyb po učebně, resp. pracovní činnost nemá až takový vliv na prachové částice, zvýšená koncentrace vždy odráží přestávku a následuje pokles po začátku hodiny bez ohledu na činnost. Peak z úterka během dílen se nijak nelišil od peaků v ostatních dnech, dokonce maximální hodnota byla naměřena v pátek, ale denní maxima dosahovala podobných hodnot. Naproti tomu v první učebně při tvořivých dílnách byla naměřena skoro dvojnásobná hodnota maxima proti prvnímu dni, kdy probíhala normální výuka. V obou učebnách platí, že maximální hodnoty jsou vždy vázány na konec výuky a s ním související úklid třídy a zvýšená aktivita při něm.

Nejmenší koncentrace byly naměřeny ve středu, přestože v tento den probíhala výtvarná výchova, u které bychom mohli předpokládat zvýšené koncentrace. Při porovnání laboratorních deníků vyšlo najevo, že ve středu byla nejvyšší intenzita větrání, což vede k závěru, že při nízkých hodnotách prachových částic venku je zvýšená ventilace prostředkem ke zlepšení kvality ovzduší uvnitř.

Průměrná koncentrace dosáhla hodnoty $23 \mu\text{g.m}^{-3}$, medián činil $15 \mu\text{g.m}^{-3}$, maximum bylo naměřeno ve výši $91 \mu\text{g.m}^{-3}$, této hodnoty dosáhla koncentrace PM_{10} v 12:40 dne 15. 4. 2011.



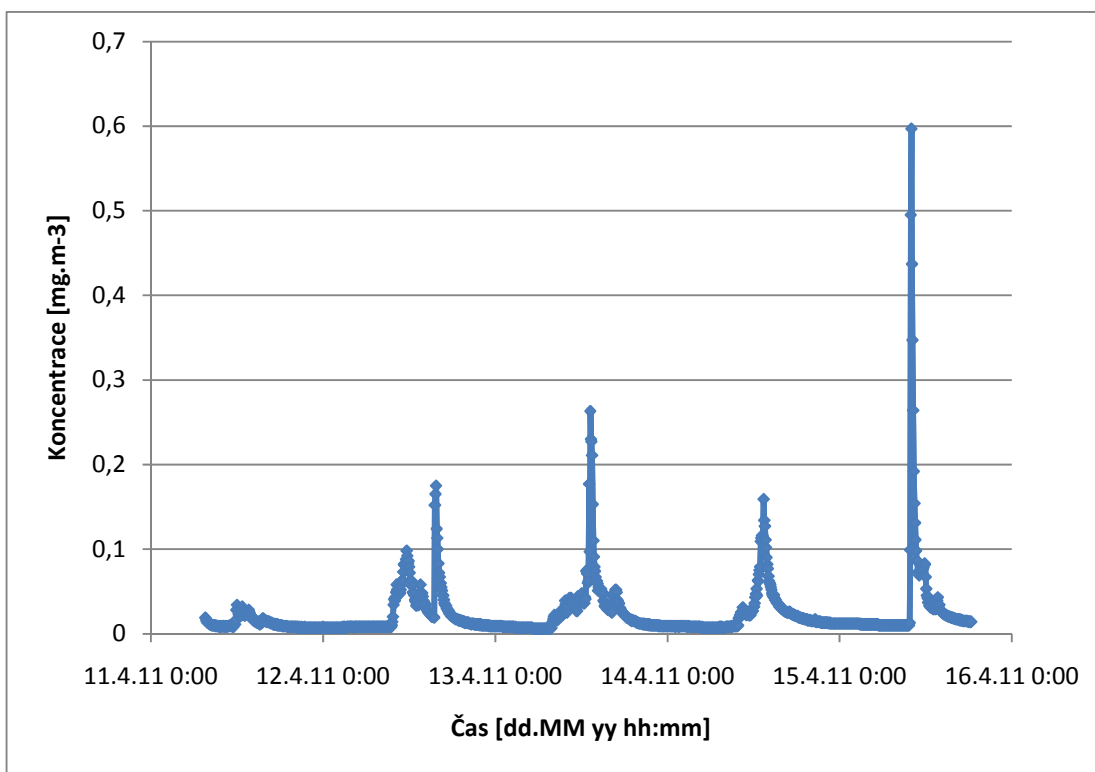
Obrázek 3: Koncentrace PM_{10} – učebna 2

Čtvrtý obrázek zobrazuje výsledky měření PM_{10} ve třetí učebně, která slouží jako odborná pracovní výtvarné výchovy. Předpoklad zvýšené prašnosti související s pracovní

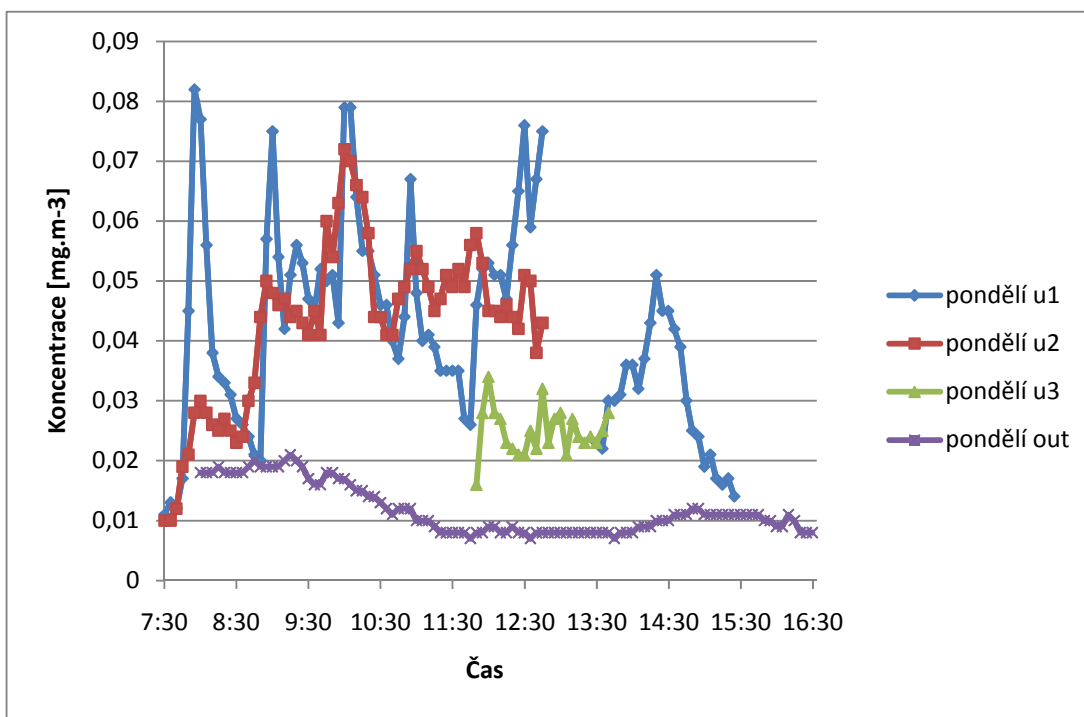
činností se naplno potvrdil, zde naměřená maxima několikanásobně překonala nejvyšší naměřené hodnoty z učeben na prvním stupni. Jasnou příčinou je zde pracovní proces žáků.

Rovněž byl potvrzen trend o vlivu přestávky, protože maximální hodnoty byly opět měřeny v časech přestávky. V pondělí, kdy v dílně nedocházelo k pracovní aktivitě, protože žáci pouze sledovali film, zde byly naměřeny nižší hodnoty než v první a druhé měřené třídě. V této učebně, jako jediné ze tří měřených, kolísá počet žáků, protože se zde střídaly jednotlivé třídy. Nicméně nebyla prokázána souvislost mezi vyšším počtem žáků a vyšší koncentrací prachových částic.

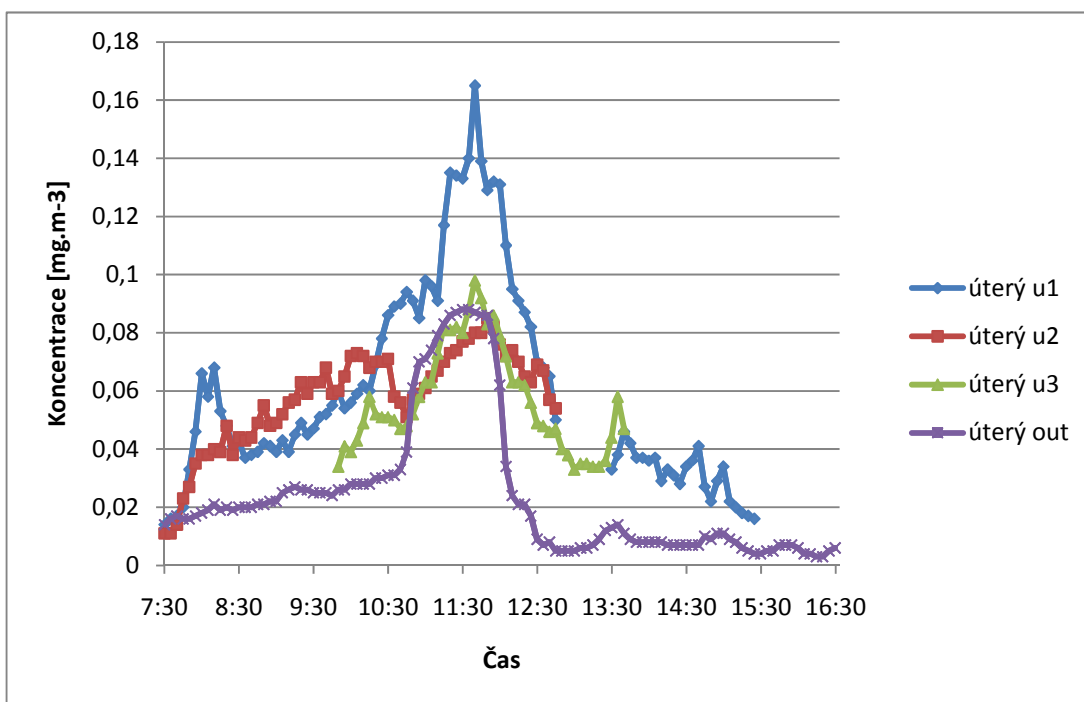
Při hodnocení jednotlivých činností v učebně v závislosti na měřené koncentraci vyšlo najevo, že v době pátečního maxima žáci nacvičovali na divadelní představení a nikoliv pracovali s barvami. Zdá se tedy, že v prašném prostředí výtvarné dílny při zvýšeném pohybu došlo ke zviření prachu, který pak dosáhl nejvyšších koncentrací za celý týden. Rozhodujícím faktorem se jeví míra pohybu, silně podporovaná prostředím.



Obrázek 4: Koncentrace PM₁₀ – učebna 3 – dílna výtvarné výchovy



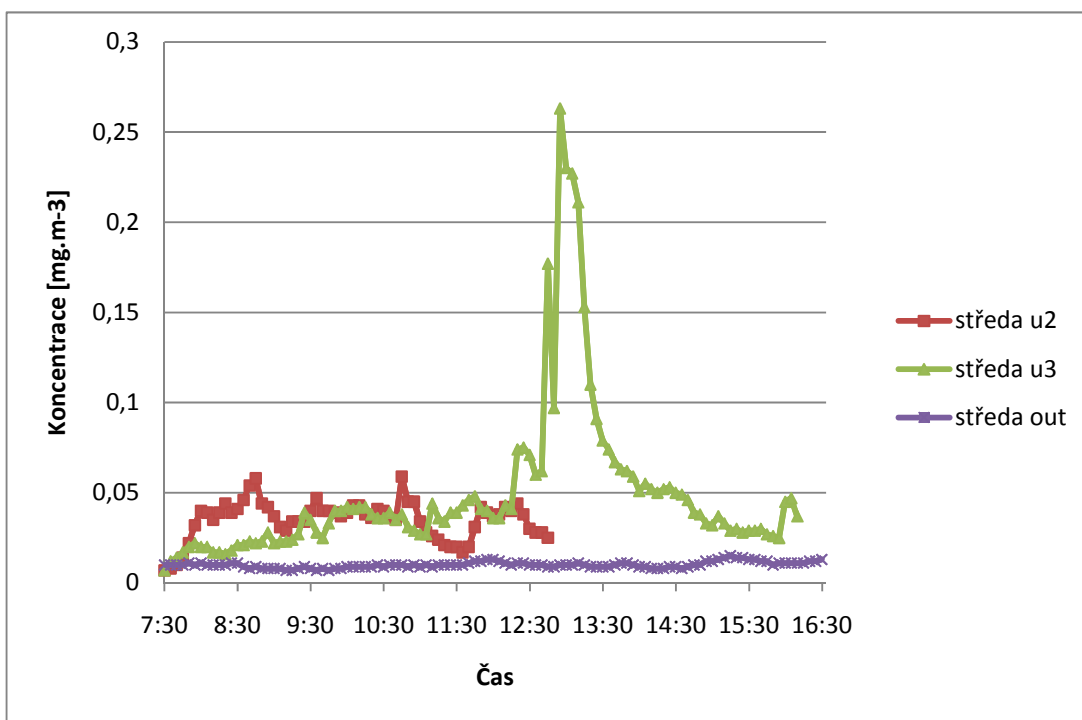
Obrázek 5: Srovnání koncentrace PM₁₀ v učebnách v době výuky dne 11. 4. 2011



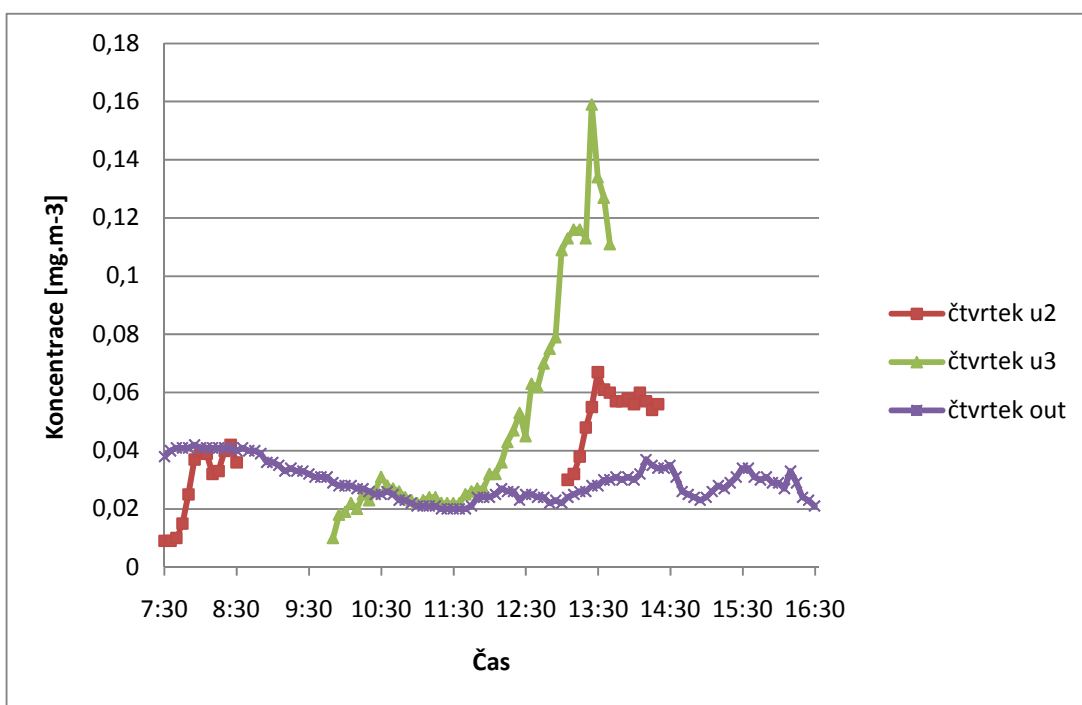
Obrázek 6: Srovnání koncentrace PM₁₀ v učebnách v době výuky dne 12. 4. 2011

Průměrná hodnota PM₁₀ ve výtvarné dílně činila 23 $\mu\text{g.m}^{-3}$, medián 12 $\mu\text{g.m}^{-3}$, maximum bylo naměřeno ve výši 597 $\mu\text{g.m}^{-3}$, této hodnoty dosáhla koncentrace PM₁₀

v 10:00 dne 15. 4. 2011. Vezmeme-li v úvahu další lokální maxima, pak střeční hodnota přesahuje tu čtvrtční z důvodu menšího počtu vyučovacích jednotek ve třídě.



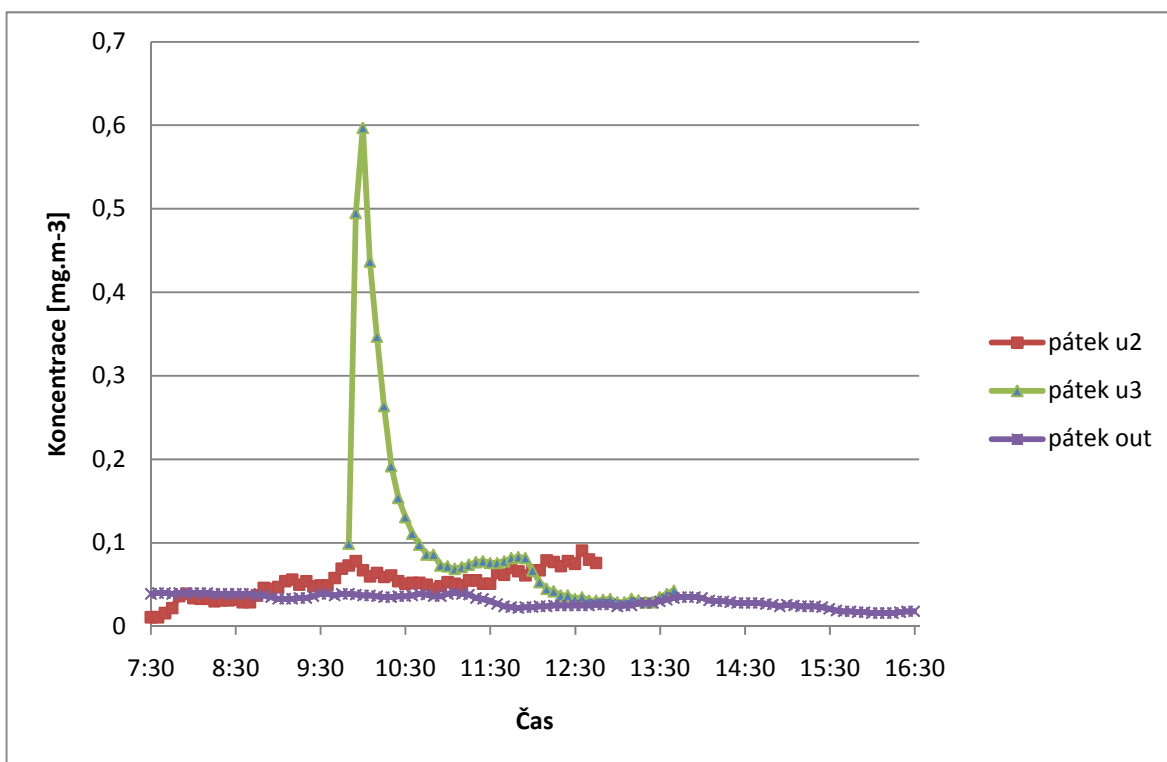
Obrázek 7: Srovnání koncentrace PM_{10} v učebnách v době výuky dne 13. 4. 2011



Obrázek 8: Srovnání koncentrace PM_{10} v učebnách v době výuky dne 14. 4. 2011

U měřených koncentrací aerosolu nebyl prokázán výrazný vliv vnějšího prostředí. V době, kdy byli žáci přítomni v učebně, dosahovaly venkovní koncentrace vyšší hodnoty než vnitřní až na výjimku v úterý dopoledne. Ovšem ani tam se neukázalo zvýšení vnitřní koncentrace, které by reagovalo na tu venkovní.

Největší pozornost si zasluhují hodnoty koncentrací v době výuky, den po dni je zachycují Obrázky 5-9. Tyto hodnoty se zdají být více vypovídající než celkové průměry.



Obrázek 9: Srovnání koncentrace PM₁₀ v učebnách v době výuky dne 15. 4. 2011

Jako čas, který děti tráví ve třídě, byl brán počátek v 7:30, děti postupně chodí do třídy až do 7:55, jako konec byl brán konec vyučovací doby plus 10 minut, během kterých žáci opouštějí učebnu. V případě dílny výtvarné výchovy byla použita data vždy deset minut před rozvrhovanou výukou a 10 minut po ní. Pauza na oběd nebyla rovněž započtena.

Průměry a hodnoty mediánu vypočtené právě z těchto hodnot mohou sloužit k přesnější představě o kvalitě prostředí ve školách než průměry vypočtené za celý týden. Například ve druhé měřené učebně dne 12. 4. byla hodnota mediánu během výuky 45 $\mu\text{g.m}^{-3}$, zatímco medián pro celou dobu měření činil 15 $\mu\text{g.m}^{-3}$, tedy během výuky jde o trojnásobnou hodnotu.

Při tomto zohlednění už nebyly tak výrazné rozdíly mezi učebnami prvního stupně a výtvarnou dílnou. I tak jsou v dílně zjištěny vyšší koncentrace, ale po krátkém maximu dochází opět k poklesu hodnot. Nejvyšší peaky překvapivě nezpůsobila činnost v odborné učebně, ale příchod a odchod žáků v učebně, absolutní maximum bylo naměřeno ještě v rámci konce přestávky, vysoké hodnoty pak byly naměřeny při nácviku divadelního představení.

Všechna měření doplněná zápisníky od učitelů jednoznačně ukazují, že neorganizovaný pohyb žáků během přestávek představuje největší faktor, který vede ke zvýšené koncentraci prachových částic. Jedná se zřejmě o usazené částice na podlaze učeben, což pak představuje největší riziko v kombinaci s dalšími prашnými procesy během výuky, jakými bezesporu kresba a malba je, proto pak byly nejvyšší hodnoty měřeny právě v dílně výtvarné výchovy.

Během noci se koncentrace PM uvnitř ustálila na hodnotách od 7 do 10 mikrometrů, ovšem postupný pokles až k těmto číslům trval i několik hodin. Při takřka nulové ventilaci působí třídy jako uzavřené systémy, vnitřní prostředí tak neodráželo stav toho venkovního.

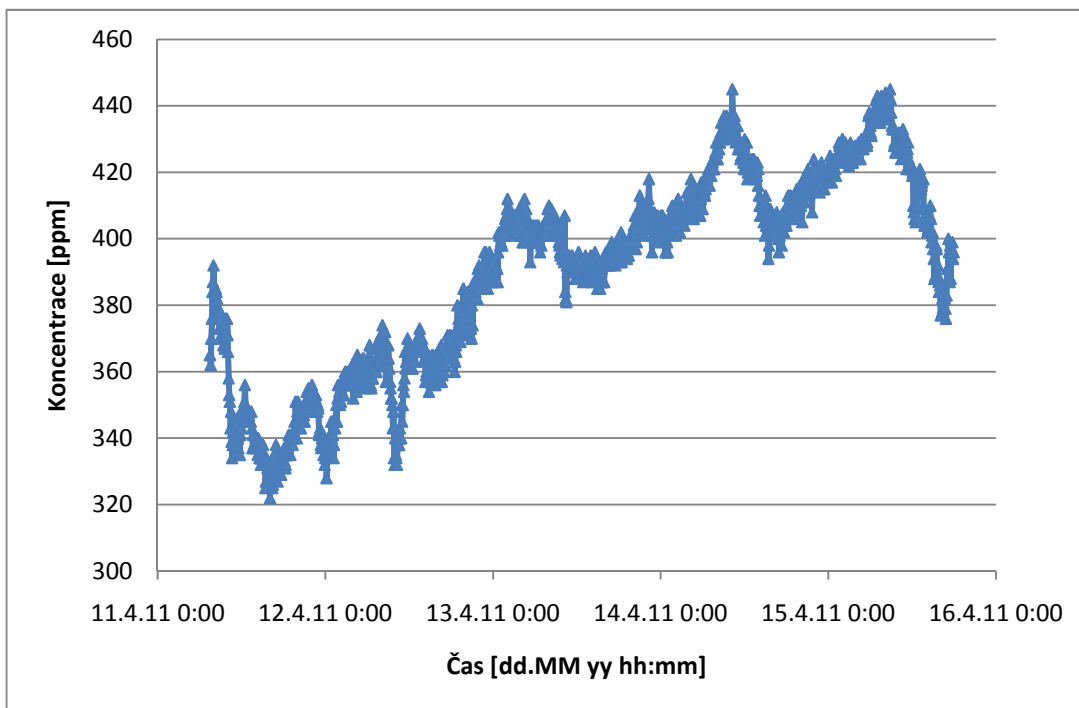
3.3.2 Hodnoty CO₂

Podle očekávání hodnoty oxidu uhličitého ve venkovním prostředí nijak výrazně nekolísaly, pouze ke konci týdne lze pozorovat mírné zvýšení, koncentrace se pohybovaly od 322 ppm do 455 ppm, celý průběh hodnot znázorňuje Obrázek 10.

V první měřené učebně můžeme sledovat velké kolísání hodnot, které ukazuje na střídavou ventilaci, která vede vždy ke krátkodobému zlepšení, po kterém rychle následuje návrat na původní vysokou hodnotu. Přesto zde nebyla ani jednou překročena hodnota 2000 ppm, maximum bylo 1838 ppm. Celkově v první měřené třídě byly naměřeny nižší koncentrace než ve druhé. Všechny hodnoty a trendy zachycuje Obrázek 11, červená linie ukazuje ASHRAE standard 1000 ppm.

Ve druhé učebně po většinu času naměřené hodnoty překračovaly ASHRAE standard 1000 ppm. Propad ve čtvrtek dopoledne byl způsoben absencí žáků v učebně, horší výsledky lze přičíst nižší intenzitě ventilace vzduchu. V této učebně byla překročena v jeden den i hranice 2000 ppm. Koncentrace CO₂ ve druhé měřené učebně je zachycena na Obrázku 12, červená linie ukazuje ASHRAE standard 1000 ppm.

Hodnoty koncentrace CO_2 ve výtvarné dílně jsou zobrazeny na Obrázku 13, červená linie ukazuje ASHRAE standard 1000 ppm, opět je zde vidět kolísání hodnot způsobené větráním pozorovatelné ve čtvrtek a naopak neustále se zvyšující se tendence v pátek, kdy nedocházelo k ventilaci učebny.

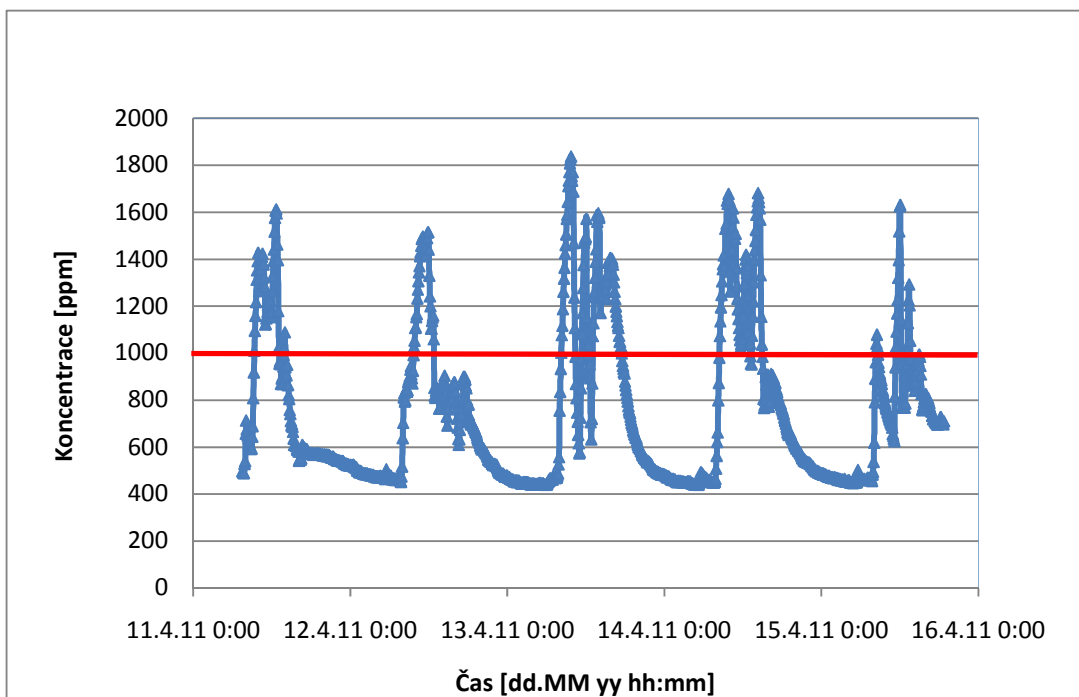


Obrázek 10: Koncentrace CO_2 v okolí školy

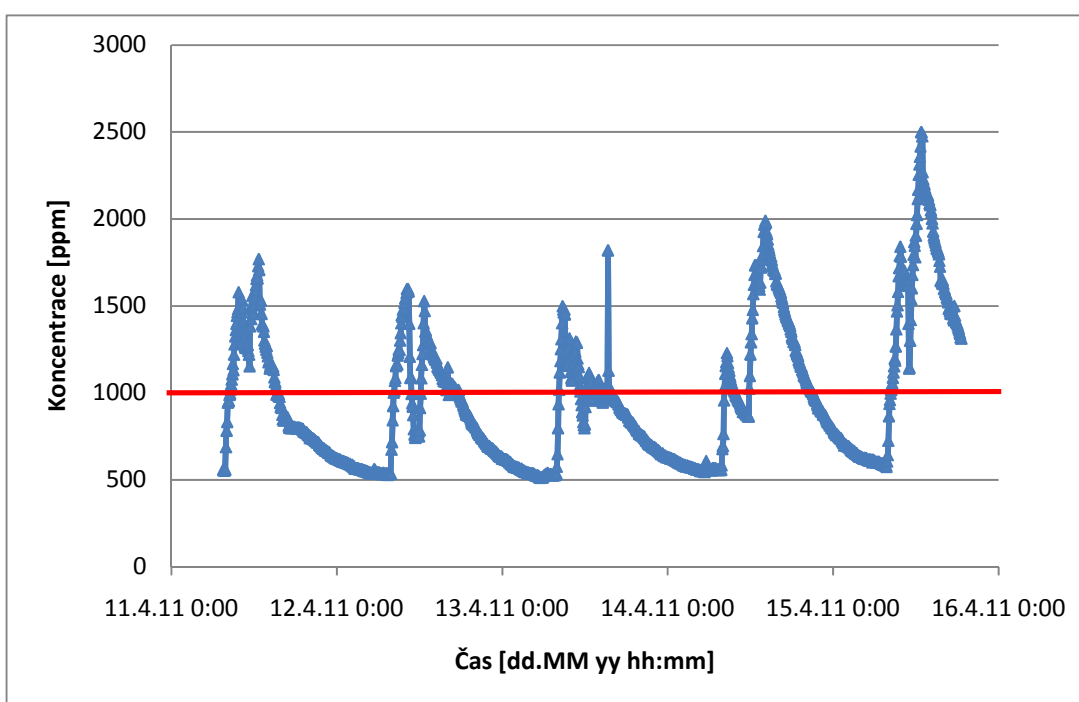
Koncentrace CO_2 odráží ventilační podmínky v učebnách, platí, že čím vyšší ventilace, tím nižší koncentrace CO_2 . Můžeme sledovat skokové zlepšení vlivem ventilace, přesto však dochází k lineárnímu zvyšování koncentrací během dne v obou učebnách na prvním stupni. Pokud jde o výtvarnou dílnu, tam dosahovaly koncentrace nejmenších hodnot, kromě ventilace zde hrál roli také menší počet žáků a méně odučených jednotek v učebně.

V porovnání s koncentrací PM_{10} je také vidět trend zvýšených hodnot po obsazení třídy žáky, ale nedochází k němu tak rychle jako v případě prachu, tempo růstu je závislé na ventilaci. Hodnoty 1000 ppm je dosaženo obvykle v průběhu první nebo druhé vyučovací jednotky, koncentrace pak dále kolísá, nicméně i tak dosahuje vysokých průměrných hodnot, často přes hranici 1000 ppm.

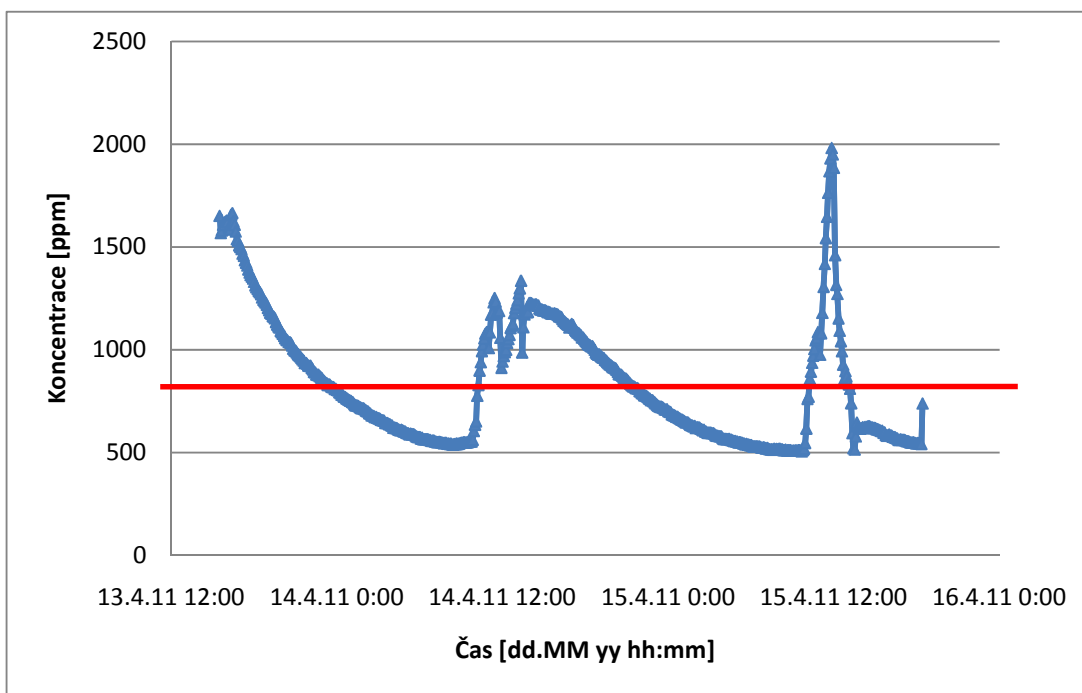
Stejně jako v případě PM_{10} je i u koncentrace CO_2 nejvíce důležité sledovat množství oxidu uhličitého v čase výuky. Pokud vezmeme v úvahu pouze tento čas, dojde k výraznému navýšení průměru.



Obrázek 11: Koncentrace CO_2 v učebně 1



Obrázek 12: Koncentrace CO_2 v učebně 2



Obrázek 13: Koncentrace CO₂ v učebně 3

3.3.3 Hodnoty teploty a relativní vlhkosti

Teplota si ve všech učebnách držela téměř konstantní ráz, naměřené hodnoty se pohybovaly mezi 21-23 °C, relativní vlhkost se pohybovala ve všech učebnách mezi 30-50%, nejvíce pak hodnota kolísala kolem 35%.

3.4 Diskuse

V rámci pilotního měření byly zjišťovány koncentrace PM₁₀ a CO₂ v pětiminutových intervalech po celý týden od 11. do 15. 4. 2011. Měření bylo prováděno ve třech vybraných učebnách v budově FZŠ Otokara Chlupa, v klidné části Prahy.

Jak již bylo řečeno v úvodu, v České republice proběhlo na základních školách ještě měření provedené SZÚ, to proběhlo v 10 vybraných školách. V celé této části bude provedeno srovnání s tímto měřením (Mikešová, Kotlík 2008). Celkem v této studii proběhlo měření ve 141 učebnách, přičemž byla měřena koncentrace PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, CO₂, teploty a relativní vlhkosti. Vždy bylo měřeno ve dvou po sobě jdoucích hodinách včetně přestávky. Přehled výsledků je zobrazen v tabulce 1.

Tabulka 1: Výsledky měření v českých školách

	PM 10 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	CO ₂ [ppm]
medián	146	1240
průměr	155	1338
doporučení	150	1200-1500 (1000 ASHRAE)

Zdroj: Mikešová, Kotlík (2008)

Ve srovnání s tímto měřením, byly ve FZŠ Otokara Chlupa naměřeny nižší koncentrace PM₁₀, což ale může být zkresleno roční dobou, protože měření SZÚ proběhlo v topné sezóně. Koncentrace CO₂ dosahovala v obou projektech podobných hodnot. Pokud jde o prachové částice, pak lze jednoznačně konstatovat, že v pilotním měření byl v některých hodinách nárazově překročen limit ve výši 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ale velmi rychle opět koncentrace poklesla, zatímco koncentrace oxidu uhličitého byla po většinu výuky vyšší než 1000 ppm, nárazově pak vyšší než 1500 ppm.

Výsledky pilotní studie stejně jako výsledky měření SZÚ ukázaly na významný vliv přestávky na zvýšení koncentrace PM₁₀, následovaný postupným snižováním v průběhu hodiny. Že zvýšení pohybu žáků, resp. pouhá jejich přítomnost, vede ke zvýšení koncentrace PM₁₀ potvrzují i další studie (Diapouli et al., 2008) (Fromme et al., 2008).

Obě česká měření ukázala významný vliv ventilace na koncentraci CO₂. Pilotní měření dále ukázalo, že pracovní procesy ve výtvarné dílně vedou k vyšší koncentraci PM₁₀, nicméně i tak chaotický pohyb před hodinou se i tam ukázal být hlavním zdrojem zvýšené koncentrace prachu.

Největší problém s relevancí výsledků spočívá ve výběru vyučovacích jednotek, které zahrneme do měření. Mezi jednotlivými učebnami i hodinami jsou vysoké rozdíly (Diapouli et al., 2008). Pilotní studie ukázala, že koncentrace PM skokově stoupá při příchodu žáků do školy, pak znovu o velké přestávce a poslední peak byl sledován při skončení výuky. Budeme-li tedy provádět měření v jedné z těchto hodin, pak můžeme dostat odlišné výsledky proti klidnějším hodinám v průběhu dne.

3.5 Závěr pilotního měření

Pilotní měření proběhlo ve FZŠ Otokara Chlupa v klidné lokalitě pražského sídliště. Pro měření byly vybrány tři učebny, dvě z prvního stupně a dílna výtvarné výchovy.

V pětiminutových parametrech byly měřeny koncentrace PM_{10} , CO_2 , teploty a relativní vlhkosti.

Obě učebny z prvního stupně vykazovaly podobné hodnoty PM_{10} , přičemž maxima byla vždy během přestávek s tendencí postupného růstu během dne. Ukázalo se také, že zvýšená ventilace má pozitivní vliv na kvalitu ovzduší. V případě učebny výtvarné výchovy byla zjištěna obrovská variabilita mezi jednotlivými hodinami. Pohyb žáků se ukázal být hlavním faktorem, který ovlivňuje koncentraci PM_{10} ve třídách.

Koncentrace oxidu uhličitého nereagovala tak rychle na příchod žáků jako koncentrace prachových částic, nicméně i zde byla znát vzestupná tendence během dne. Během přestávek nebyly zjištěny žádné výkyvy, také počet žáků ve třídách nebyl klíčový. Bylo prokázáno, že ventilace je hlavním faktorem ovlivňujícím koncentraci CO_2 . V drtivé většině vyučovacích hodin byla překročena hranice 1000 ppm, v jedné učebně došlo i k překročení hranice 2000 ppm.

Přestože bylo měřeno pouze v jedné budově a třech učebnách, i tak se ukázala vysoká variabilita podmínek v těchto učebnách, stejně tak jako různorodost činností v rámci běhu školy, protože jinak vypadá aktivita dětí při klasické a jinak při projektové výuce. Právě různorodost podmínek je největším úskalím při nacházení obecných závěrů, proto pro ověření výsledků by bylo nejlepší provést další měření.

4 Závěr

Všichni autoři studií kvality ovzduší ve školách na celém světě se shodují, že špatná kvalita ovzduší ve školách je závažným problémem, kterému není věnována dostatečná pozornost. Je poukazováno, že ke zlepšení je třeba provést další studie, které povedou k lepšímu pochopení celé situace a ke zlepšení kvality ovzduší ve školách.

V této práci bylo poukázáno na hlavní faktory ovlivňující vnitřní prostředí ve školách, přičemž největší důraz byl kladen na problematiku prachových částic a ventilace. Tento výběr byl učiněn vzhledem k navazujícímu měření. Formulované závěry a hypotézy byly částečně ověřeny v pilotním měření, další pak mohou být předmětem další práce.

Pro lepší pochopení vlivů na kvalitu ovzduší ve školách je třeba provést další měření. Srovnat na stejné škole koncentrace v létě a zimě, provést měření také na jiných školách v podobné i zcela odlišné lokalitě. Dále je možné měřit i jiné parametry, $PM_{2,5}$ pro případné prokázání vlivů vnějšího prostředí, zejména pak dopravy. Ohledně pokrytí podlahy vybrat v rámci jedné školy více učeben s kobercem a bez něj.

Přestože proběhlo měření pouze ve třech třídách v rámci jedné školy, i tak lze z výsledků odečíst zajímavé informace. Jednou z nich je, že nejvyšší hodnoty aerosolu byly naměřeny během přestávek, dále pak, že neorganizovaný pohyb po učebně je významnějším faktorem než samotný pracovní proces ve výuce.

Pro zlepšení kvality ovzduší ve třídách by tedy mohlo stačit více uklidnit žáky během přestávek, v případě výtvarné dílny by pomohlo, kdyby žáci trávili přestávky mimo učebnu na chodbě. Pokud jde o koncentraci oxidu uhličitého, pak by řešením mohla být diskuse s pedagogy a následný návrh ventilačního režimu.

Pro zjištění účinnosti těchto opatření by bylo zajímavé provést měření pro získání informací, jak moc navrhované řešení pomohlo a pak provést další měření, s odstupem času, které by ukázalo, jak dlouho vydrží případné novinky v chodu školy. Obecně vzato, právě vnitřní chod školy je velmi různorodým a zároveň i významným faktorem, přičemž jeho změna není nijak ekonomicky náročná a může přispět ke zlepšení podmínek ovzduší ve školách.

Kvalita ovzduší ve školách představuje komplexní problém, který obsahuje až příliš proměnných, přesto lze pozorovat určité pozitivní i negativní trendy, na které se tato práce snažila upozornit. Pro lepší pochopení celé situace a zvláště pak zodpovězení nastolených otázek a potvrzení či vyvrácení hypotéz je třeba provádět další měření.

5 Seznam použité literatury

- Abramson, S. L., Turner-henson, A., Anderson, L., Hemstreet, M. P., Bartholomew, L. K., Joseph, Ch. L. M., Tang, S., tyrell, S., Clark, N. M., Ownby, D., (2006): Allergens in school setting: results of environmental assessments in 3 city school systems, *Journal of School Health*, 76, (6): 246-249
- Avigo, D., Godoi, A. F. L., Jannisek, P. R., Makarovska, Y., Krata, A., Potgieter-Vermaak, S., Alföldy, B., van Grieken, R., Godoi, R. H. M. (2008): Particulate matter analysis at elementary schools in Curitiba, Brazil, *Anal. Bioanal. Chem.*, 391: 1495-1468
- Barlett K. H., Martinez, M., Bert J. (2004): Modeling of occupant-generated CO₂ dynamics in naturally ventilated classrooms, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1: 139-148
- Bell ML, Davis DL (2001): Reassessment of the lethal London fog of 1952: Novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution, *Environmental Health Perspectives* 109 Suppl. 3: 389-394
- Braniš, M., Šafránek J., Hytychová A. (2009): Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school, *Building and Environment* 44, 1246–1252
- Braniš, M., Šafránek, J. (2011): Characterization of coarse particulate matter in school gyms, *Environmental Research*, 111 (4), 485-491
- Corsi, R.L., Torres, V. M., Sanders, M., Kinney, K. A. (2002): Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: results of the Tesias study, *Indoor Air*, 74-79
- Diapouli, E., Chaloulakou, A., Spyrellis, N. (2007): Indoor and outdoor particulate matter concentrations at schools in the Athens area, *Indoor And Built Environment*, 16, (1): 55-61

- Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., Spyrellis, N. (2008): Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area, *Environ. Monit. Assess*, 136: 13-20
- Ekmekcioglu D., Keskin, S. S. (2007): Charakterization of indoor air particulate matter in selected elementary schools in Istanbul, Turkey, *Indoor And Built Environment*, 16, (2): 169-176
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Rűden, H. (2007): Particulate matter in the indoor air classroom-exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmosferic Environment*, 41: 854-866
- Fromme, H., Dieme, J., Cyrys, J., Heinrich, J., Lang, W., Kiranoglu, M., Twardella, D. (2008): Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air, *Atmospheric Environment*, 42: 6597-6605
- Geelen, L. M. J., Huijbregts, M. A. J., Ragas, A. M. J., Bretveld, H. W. A., Jans, H. W. A., van Doorn, W. J., Evertz, S. J. C. J., van der Zijden, A. (2008): Comparing the effectiveness of interventions to improve ventilation behavior in primary schools, *Indoor Air*, 18: 416-424
- Grimsurd, D., Bridgers, B., Schilte, R. (2006): Continous measurements of air quality parametres in schools, *Building Research and Information*, 15, (5): 447-458
- Hedge, A. (2001): Carpets in schools don't compromise indoor air quality says Cornell researcher, Cornell University Press release, March 9, 2001, Ithaca, NY
- Heyman, E. (1880): Contribution to the knowledge on the quality of air in schools (in Swedish with French summary). *Nord Med Ark XII* 2: 1-47
- Hůnová I., Šantroch J., Ostatnická J. (2004): Ambient air quality and deposition trends at rural stations in the Czech Republic during 1993–2001, *Atmospheric Environment* 38, (6): 887-898
- John, K., Karnea, S., Crist, K., Kim, M. (2007): Analysis of trace elements and ions in ambient fine particulate matter at three elementary schools in Ohio, *Air and Waste Association*, 57: 394-406

- Kinshella, M. R., van Dyke, M. V., Douglas, K. E., Martyny, J. W. (2001): Perceptions of indoor air quality associated with ventilation system types in elementary schools, *Occupational and Environmental health*, 16, (10): 952-960
- Leech J, Nelson WC, Burnett RT, Aaron S, Raizenne ME (2002): It is about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns: *J Exposure Anal Environ Epidemiol*;12: 427–432
- Mikešová M., Kotlík B., (2008): Závěrečná zpráva z měření kvality vnitřního prostředí a mikroklimatických parametrů ve školách, SZÚ Praha
- Norbäck, D., Nordström, K. (2008): An experimental study on effects of increased ventilation flow on students' perception of indoor environment in computer classrooms, *Indoor Air*, 18: 293-300
- Parker, J. L., Larson, R. R., Eskelson, E. Wood, E. M., Veranth J. M. (2008): Particle size distribution and composition in mechanically ventilated school building during air pollution episodes, *Indoor Air*, 18: 386-393
- Pettenkofer, M.v. (1858) *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*, Munchen, J. G.Cottaschen Buchhandlung
- Pope III CA, Dockery DW (2006): Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc* 2006;56:709–42z
- Sawant, A. A., Na, K., Zhu, X., Cocker, K., Butt, S., Song, Ch., Cocker III, D. R. (2004): Characterization of PM_{2.5} and selected gas-phase compounds at multiple indoor and outdoor sites in Mira Loma, California, *Atmospheric Environment*, 38: 6269-6278
- Schwartz, J. (2004): Air Pollution and Children's Health, *Pediatrics*, 113: 1037–1043
- Schwarze, P.E., Øvrevik, J., Låg, M., Refsnes, M., Nafstad, P., Hetland, R.B., Dybing, E.: (2006): Particulate matter properties and health effects: Consistency of epidemiological and toxicological studies, *Hum. Environ. Toxicol.* 25, 559–579

- Shaughnessy, R. J., Turk, B., Evans, S., Fowler, F., Casteel, S., Louie, S. (2002): Preliminary study of flooring in school in the U.S.: airborne particulate exposures in carpeted vs. uncarpeted classrooms, *Indoor Air*, 974-979
- Shaughnessy, R. J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandres, D. (2006): A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance, *Indoor Air*, 16: 456-468
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., Faulkner, D. (2004): Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air*, 14: 333-341
- Stevenson, D., Johnson, C., Highwood, E., Gauci, V., Collins, W., and Derwent, R. (2003): Atmospheric impact of the 1783-1784 Laki eruption: Part I chemistry modelling, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 3, 551-596
- Wallinder, R., Norback, D., Wieslander, G., Smedje, G., Erwall, C., Venge, P. (1998): Nasal patency and biomarkers in nasal lavage – the significance of air exchange rate and type ventilation in schools, *Int Arch Occup Environ Health*, 71: 479-486
- Ward, T. J., Noonan, C. W., Hooper, K. (2007): Results of an indoor size fractionated PM school sampling program in Libby, Montana, *Environ. Monit. Assess.*, 130: 163-171
- Wei F., Teng, E., Wu, G., Hu W., Wilson, W. E., Chapman, R. S., Pau, J. C., Zhang, J. (1999): Ambient concentration and elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in four Chinese cities, *Environ. Sci. Technol.*, 33:4188-4193
- Zöllner, I., Gabrio, T., Link, B. (2007): Concentrations of particulate matter in schools in southwest Germany, *Inhalation Toxicology*, 19, (1): 245-249